

バイリンガルスト룹テスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究：第2言語習得年齢比較横断研究

菊池優希*・田浦秀幸**

[要旨]

第2言語習得の重要な要因の1つとして、第2言語接触開始年齢が挙げられる。外国語学習にはある時期が過ぎると言語習得が困難となるという臨界期仮説があり、この時期が過ぎる頃には、大多数の右利きの人は左半球へ言語機能の側位化が完了すると考えられる。これまでの先行研究では早期に2言語に接している早期バイリンガルは2言語運用の際に脳の賦活に共通の傾向が見られるのに対し、遅延バイリンガルの2言語運用における脳の賦活は異なることが明らかとなっている。

本研究では、第2言語接触開始年齢が2言語運用の際の脳の賦活に与える影響を調査することに主眼を置いている。第2言語接触開始年齢の異なる127名の被験者を対象とし、日英語でのバイリンガルスト룹テスト(Bilingual Stroop Test; BST)を実施した。実験では行動データとしてタスク遂行時間と正答率、さらにこれら2つの積を調べた。また脳の賦活に関してはタスク遂行時の脳の左部位と右部位に主眼を置きfNIRSを用いて調べた。その結果、書かれている色名を読むタスク(=congruentタスク)遂行時には生前に2言語に接しているかどうかの脳の賦活に影響を与える要因となることが分かった。また書かれている色名とそのインクが異なり、文字に惑わされずにインクの色を答えるタスク(incongruentタスク)においては小学校入学前に2言語に接しているかどうかの脳の賦活に影響を及ぼすことが明らかとなった。

*菊池優希：大阪府立大学学生

** 田浦秀幸：立命館大学 言語教育情報研究科教授

第 1 章 はじめに

第 1 章では先行研究を概観し、未開拓の分野の特定から本研究を行う目的とリサーチ・クエスチョンを述べる。

1.1．先行研究

近年の技術革新により脳内観察の技術が発展し、人間が脳のどの部位を使って言語処理を行っているのかが明らかになってきた。脳科学からの言語学へのアプローチは外国語学習者の言語能力評価への応用など、今後ますます発展していく学問分野である（横山他，（2007））。

これまでの健常者を対象とした母語と第 2 言語を使用した実験から学習者の第 2 言語接触開始年齢や習熟度、第 2 言語活動頻度によって言語タスク実行時の脳活性に差異が見られるということが明らかになってきた（Chee *et al.*（1999）, Kim *et al.*（1997）, Ojima *et al.*（2010）, Perani *et al.*（1998）, 石川，（2009）, 大石・木下，（2008）, 丸山他，（2008））。これらの要因の中で、第 2 言語接触開始年齢が 2 言語の脳活性に影響を与える理由として Lenneberg（1967）が提唱した臨界期仮説がある。この仮説では、外国語学習には、ある時期を過ぎると学習が不可能になる期間である臨界期が存在すると考えられているが、しかしその臨界期の具体的な時期に関しては様々な解釈がされている。Newport（1990）では 4 歳、6 歳、12 歳が臨界期にあたるとしているが、白井（2008）では思春期の始まり（12、3 歳）までであると考えられているが、土屋・広野（2000）では 10 歳くらいとしている。加えて音声の習得に関してはより早い時期に臨界期があるとも考えられている。そのため幼少期から 2 言語に接していると均衡バイリンガルになりやすいと考えられており、脳の賦活にも影響を与えると考えられる。また言語には大脳半球優位性があり、右利きの人のおよそ 96 パーセントは言語機能が左脳に局在している（酒井，（2002））が、左脳の賦活の度合いは、第 2 言語の習熟度によって異なることがこれまでの先行研究で明らかとなってきた。

これまでの脳機能イメージングを使った研究では PET（positron emission tomography: ポジトロン陽電子断層撮影法）や fMRI（functional magnetic resonance imaging: 機能的磁気共鳴画像法）が中心となっている（酒井，（2002））。しかし、こうした大型装置は身体を固定してしまうため、小児を対象とすることが困難であり、また日常での使用と同等である自然な環境下で測定するのには適していない。加えて実験中は騒音を伴ってしまう欠点も指摘されている。

fMRI や PET と比較して、被験者の身体的、精神的負担を軽減できる脳機能測定として fNIRS（functional near-infrared spectroscopy: 機能的近赤外線分光法）がある。fNIRS は非侵襲であり、無害な光を使うことなどから安全性も高く、乳幼児を対象とした研究にも用いられている（福田，（2009））。fNIRS を用いて被験者の母語と第 2 言語をタスクとして使用

した先行研究をいくつか以下にまとめる。

英語の習熟度が同等である日本人大学生と小学生を対象とした Kasai (2009) では、日本語と英語の頻出度別単語を復唱しているときの脳の賦活状態を fNIRS を用いて調べた。そしてほぼ全てのタスクで共通に見られる脳の賦活部位が明らかになった。また日本語タスクでは子どもの方が、英語タスクでは大人の方が広範囲で脳反応が見られた。

Scherer *et al.* (2006) ではポルトガル母語話者（被験者全員が第2言語としてフランス語を習得）を対象とし、2言語の統語処理と意味処理の際の脳の賦活を調べた。この研究から意味処理と統語処理の際には共通のネットワークで処理が行われるが、母語と第2言語では異なる脳の賦活が見られた。

Quaresima *et al.* (2002) においては、上級英語学習者であるオランダ語母語話者を対象とし、短文の翻訳タスクを実施して、その際の脳の賦活を fNIRS を用いて調べた。その結果、言語の方向性に関わらず、両言語間の翻訳時には類似した脳の賦活が左前頭葉下部でみられた。

大石 (2001) では、英語母語話者と日本人英語学習者を対象とし、リスニングとリーディングタスク実行時における言語情報処理のメカニズムを学習者のストラテジーと脳の賦活の観点から調べた。この実験から学習者によってリスニングとリーディングの学習ストラテジーは異なり、その差異によっても脳反応に影響を及ぼす可能性が示唆された。

英語の習熟度の異なる日本人英語学習者を被験者とした大石 (2006) は、リスニングとリーディングタスク実行時の脳内の活性状況を fNIRS で観察した。その結果、学習者の習熟度が上がるにつれて脳の血流増加の割合が増していくが、一定の習熟度を境とし、血流増加の割合が減少していったことが明らかとなった。さらに中級学習者の一部および上級学習者については、脳内の血流が言語野（ウェルニッケ野、聴覚野、角回、縁上回）に集中していることも解った。

大石・木下 (2008) においては英語母語話者と日本人英語学習者を対象とし、日本語と英語のリスニングにおいて背景知識の有無に関する影響を考慮しながら、脳反応の違いを fNIRS を用いて比較した。この実験から、母語は第2言語よりも選択的に言語活動に注意が向いており、背景知識があっても第2言語課題の方が、背景知識のない母語課題より多くの注意を向ける必要がある可能性が示唆された。

幼児を対象とした丸山他 (2008) において、英語活動の頻度と発達段階が母語・非母語による物語聴取時の脳の賦活に及ぼす影響を調べた。そして、発達段階が同じ幼児でも、英語活動頻度の違いによって言語刺激に対する脳活動に差が生じることと、脳活動量に関して、年齢による傾向の違いが見られなかったことを明らかにした。

これまでの fNIRS を用いた日本語と英語を対象とした研究では、主にインプットタスクや復唱タスクが中心となっている。しかし、認知活動を伴ったスピーキングタスクに関しては研究がほとんど実施されていない。

言語処理における自動的処理を調べる実験の 1 つにバイリンガルストループテストがある。ストループ効果とは、色と語の意味が不一致なカラーワードに対して、色命名反応がなされるとき、反応時間が増大し反応が困難であるという認知的葛藤現象ないし効果である（嶋田, 1994）。また、ストループテストを 2 言語で行うバイリンガルストループテストでは、母語だけではなく、習得が進んでいれば第 2 言語であってもストループ効果が見られるという（苧阪, 2000）。そして言語の習熟度によってストループ効果が増長することがこれまでの研究で明らかとなっている。苧阪（1990）では、日本人大学生を対象とし、日本語と英語、さらに被験者の第二外国語を対象言語としてバイリンガルストループテストを実施した。その結果、ストループ効果は言語間効果よりも言語内効果の方が大きいと分かった。

しかし、これまでのバイリンガルストループテストの研究では、グループ分けが被験者の第 2 言語の学習歴、またはバイリンガルの種類（均衡バイリンガルか偏重バイリンガルか）となっており（Zied *et al.* (2004)）、第 2 言語接触開始年齢に関しては行われていない。また脳機能イメージングを用いたストループテストは被験者の母語のみをタスクとしているため（Ikezawa *et al.* (2009), Sonya *et al.* (2009), Schroeter *et al.* (2002), Schroeter *et al.* (2004), Nancy *et al.* (2002) Ravnkilde *et al.* (2002), Yanagisawa *et al.* (2010)）、2 言語を対象としたバイリンガルストループテスト遂行中の脳反応に関しては明らかとされていない。

そこで本研究では第 2 言語である日本語、または英語との接触開始年齢の異なる被験者（日本語と英語の両言語を母語とする被験者をも含む）を対象とし、この 2 言語でのバイリンガルストループテストを実施し、その時の脳反応を fNIRS で調べる。本実験を実施することにより、第 2 言語接触開始年齢の差異による 2 言語処理における自動的処理時の脳反応の一端を明らかにしたい。

1.2. リサーチ・クエスチョン

日本語と英語を母語または第 2 言語とする被験者を対象とし、第 2 言語接触開始年齢が異なる被験者群間においてバイリンガルストループ課題を実行する。課題遂行中の言語スイッチ時の fNIRS 値に関して以下のことを調べる。

RQ1：第 2 言語接触開始年齢は 2 言語の文字音読の際の脳の賦活に影響を与えるのか

RQ2：認知的葛藤のあるタスク遂行時の脳の賦活は、第 2 言語接触開始年齢の影響を受けるのか

第 2 章 研究手法

本章では、被験者・データ収集方法及び分析方法を記載する。

本研究は、立命館大学研究推進プロジェクトとして 2010 年度に立命館大学大学院・言語教育情報研究科が採択された「脳科学による言語処理メカニズム解明研究: 言語習得と保持・喪失」(研究代表者は同研究科教授の田浦秀幸)の一環として行われた fNIRS を用いた 3 研究(言語流暢性検査, バイリンガルストループテスト, 翻訳タスク)の中の 1 実験であるので、倫理審査及び被験者の募集はすべて研究代表者により行われた。本論ではバイリンガルストループテスト(Bilingual Stroop Test: BST)について検証する。

2.1 被験者

被験者は母語、または第 2 言語として日本語と英語に接した 134 名である。しかし、データ収集後分析に取り掛かる前に、実験時撮影したビデオ・写真データと実験実施者による実験ノート(fNIRS 機操作者・行動記録者のメモ)を検証し、タスク遂行時の不具合及びプローブ装着ミスが発見された場合と左利きと判明した場合には分析から除外した。その結果、合計 134 名から、BST では 7 名を除外し、実験群 84 名と統制群 43 名の合計 127 名を分析対象者とした。

被験者の募集に関しては関西にある国際学校と私立大学で行った。国際学校での募集に先立ち、立命館大学「人を対象とする研究倫理審査委員会」による審査を経た(2010 年 9 月 1 日付けの承認番号は衣笠-人-2010-10)。その後、国際学校長(日本人校長及びインターナショナルスクール校長)から許可を得て、1 年生から 12 年生(日本の一条校の小学 1 年生から高校 3 年生に相当)の各担任教員を通して研究目的・実験方法を記載した研究協力申し込み用紙を配布した(補遺 1 参照)。全員未成年である為に保護者の同意を示すサイン或いは捺印のある申し込み書を回収した結果、129 人からの応募があった。学校から指定された期間内にこなせる人数に限りがあるために、99 人に実験協力依頼を行った。ただし 10 人は諸事情の為に参加できず、合計 89 名の被験者からデータ収集を行った。時期は 2010 年 9 月 20 日から 10 月 3 日まで及び 10 月 23 日から 31 日(30 日を除く)までの 22 日間で、平日は放課後・週末は終日同校内で行った。またこの実験期間中には、日本語または英語を母語として第 2 言語を思春期以降に習得したが非常に高いレベルまで達し、日常的に 2 言語を使用している同校の教職員も実験に参加した。

私立大学での実験では、英語圏滞在経験に関して多様な某私立大学(院)生の合計 45 名を被験者として含めた。尚、学生対象の実験は、2010 年 10 月 18 日から 22 日の 5 日間にわたり研究代表者の勤務先大学の個人研究室で行われた(研究参加同意書は未成年者には上記と同様の方法で、成年の場合は本人から同意書を取った)。

表 1：BST 実験の各被験者群分け基準と言語背景

群	被験者群定義	人数	年齢		第 2 言語接触 開始年齢		第 2 言語 接触期間	
			平均	標準 偏差	平均 (年齢)	標準 偏差	平均 (年)	標準 偏差
1	出生前から 2 言語接触 開始	26	12.71	3.63	0.19**	0.98	12.19**	4.01
2	出生時から 2 言語に接 触開始したが、その環境 が実験時まで継続しな かったケース	18	17.38	6.08	0.78**	0.94	11.39**	3.91
3	第 2 言語接触開始が 3 歳から小学校入学まで の間	20	16.72	3.68	4.42	0.81	7.36	2.28
4	第 2 言語接触開始が小 学校時代（6～12 歳）	20	15.71	2.54	7.60	1.76	4.40	1.67
5	第 2 言語接触開始が 16 歳以降	17	33.17**	12.98	20.82	6.08	5.14	8.24
6	第 2 言語接触開始が皆 無か数か月以内	26	21.67**	6.40	N/A	N/A	N/A	N/A

** $p < .01$

BST 分析対象者は、下記基準により 6 被験者群に分けられた（表 1）。出生前に母親の体内で既に 2 言語接触を始め、本研究の実験時にもその言語環境が継続されていたバイリンガル（両親の母語が異なるようなケース）のみ第 1 被験者群とし、1 歳の誕生日以前に第 2 言語との接触を始めたがその言語環境が本研究実施時まで継続しなかった（日本人の両親のもとにアメリカで生まれたが、その後帰国したようなケース）バイリンガルは第 2 被験者群とした。第 2 言語との接触開始が 3 歳以降で公教育開始前であれば第 3 被験者群、小学校時代（6 歳～12 歳）であれば第 4 被験者群、16 歳以降であれば第 5 被験者群とした。尚、被験者群定義に用いた「言語接触」には「学校教育における外国語」との接触は含まれず、両親や地域社会の人々との大量のインターアクションを伴う言語接触のみを含めた。そして言語接触がない、または英語圏滞在歴が半年未満の被験者を第 6 被験者群とした。各被験者群の第 2 言語接触背景を見ると、実験時の平均年齢は 16 歳以降に第 2 言語圏滞在体験のある第 5 被験者群（平均 33.1 歳）が他の被験者群よりも年齢が高い一方で、第 2 言語圏滞在歴の無い第 6 被験者群（平均 22.7 歳）は第 2（平均 16.8 歳）・3（平均 15.9 歳）被験者群と差は無いが、第 5 被験者群より低く、その他の被験者群（12.7～15.5 歳）

よりも高かった。第 2 言語圏滞在開始年齢は、第 1・2 被験者群間に差は無く他の被験者群よりも若い年齢（1 歳前）であった。第 2 言語接触期間については、第 1・2 被験者群が 11 年以上と他被験者群よりも長く、第 3～5 被験者群は 4 年～7 年半で群間差が無かった。尚、実験タスク遂行時の fNIRS 値の差がこのグループ（第 2 言語接触開始年齢）差に起因するのではなく、実験時の年齢に起因する可能性があるため、その確認の為に次のデータ比較を行った。BST タスク（下記図 2，3 参照）に先立ち、被験者全員に右手で 30 秒間タッピング動作を行ってもらい（左脳の運動野を賦活させ）、その間の fNIRS データを収集した。先ず第 1～4 被験者群から無作為に 4 名、第 5・6 被験者群からも無作為に 4 名抽出し、下記 2.4 の本実験収集生データの分析方法と全く同様の手法で、左脳のブローカ部位の fNIRS 値を 8 被験者について算出した。t 検定の結果、第 1～4 被験者群の 4 名と、第 5・6 被験者群の 4 名との間には差が無かった（ $t(153)=1.497$, $p>.05$ ）。この数値を根拠に、本研究ではデータ解釈を進めることにする。

2.2 データ収集方法

国際学校での実験は、同校の空き教室を利用した急造実験室でデータ収集を行った。大学（院）生は、研究代表者の研究室でデータ収集を行った。実験場所にかかわらず全被験者からは個別に約 40 分（入室から退出まで）かけてデータ収集を行った。

タスク開始前に、(1) 氏名確認、(2) 頭中特定と頭周計測、(3) 被験者番号を含む顔写真撮影・頭部プローブ位置確認用左・中央・右からの写真撮影、(4) フレキシブルプローブホルダーの頭部への設置と 27 プローブの装着、(5) タスク説明ビデオ聴視を行った。(3)～(4) 実施中に言語背景やエジンバラ利き手アンケート調査を実施した（補遺 2）。タスク開始に先立って、ホルダー装着の違和感やタスク中の気分の変化等に際しては実験を即刻中止する旨を伝えた。タスクは、言語流暢性検査、バイリンガルストループテスト、翻訳タスク の順で行われた（翻訳タスクは大学生のみ実施）。タスク自体は約 20 分から 25 分間で、終了後は謝礼の図書カードを渡し、質問等あれば事後にできるよう研究主担者の連絡先も渡した。

実験には機能的近赤外分光装置（functional near-infrared spectroscopy: fNIRS）として、FOIRE-3000（島津製作所）と OMM-3000（島津製作所）を用いた。両機は全く同一の機器であるが、後者は医療機器としての薬事承認を受けており（製造販売承認番号 21600BZZ00195000）、ビデオカメラ等の周辺機器を一切接続できない仕様になっている為に、被験者の実験時の様子を記録するに後者使用時のみ別途外部ビデオカメラ（SONY HDR-XR500V）を設置した（前者使用時には付属のビデオカメラを使用した）。両機とも、入射光用 13 光ファイバー・プローブ（図 の赤丸数字）と受光用 14 光ファイバー・プローブ（同青丸数字）が、縦 3 列・横 9 列に 3 センチ間隔で長方形に並べられた 42 チャンネルからなるホルダーを、被験者に装着して $780 \pm 5\text{nm}$, $805 \pm 5\text{nm}$, $830 \pm 5\text{nm}$ の波長の近赤外光を使用して血中のヘモグロビンの変化量を計測する（図 1）。プローブ及びプローブ

ホルダー装着に当たっては，最下列が脳波記録国際 10-20 法の T3-Fp1-Fz-Fp2-T4 のラインに一致するように注意し，頭周及び正中線に沿って Cz-Nz（鼻根点）と Cz（最頭頂部）間の距離を記録した。

タスク遂行中は，fNIRS 機・被験者の顔の様子を記録するためのビデオカメラ・行動データを記録するための IC レコーダー(SONY PCM-D50)による計測を行った。fNIRS 機は，前頭葉の 42 部位における「血液成分のヘモグロビンの濃度変化（mM）と光路長（cm）の積」を酸化ヘモグロビン（oxy-Hb），脱酸化ヘモグロビン（deoxy-Hb），総合ヘモグロビン（total-Hb）値としてモニター上に 3 色のトレンドグラフとして瞬時に提示する。脳内が活性化すると活動に必要な酸素を供給するために，酸素を運ぶ酸化ヘモグロビンの濃度が増すということがこれまでの研究から明らかになっているため，血液中の酸化ヘモグロビン量で脳の活性状態が判断できる。よって本研究では酸化ヘモグロビンのみを分析対象とする。

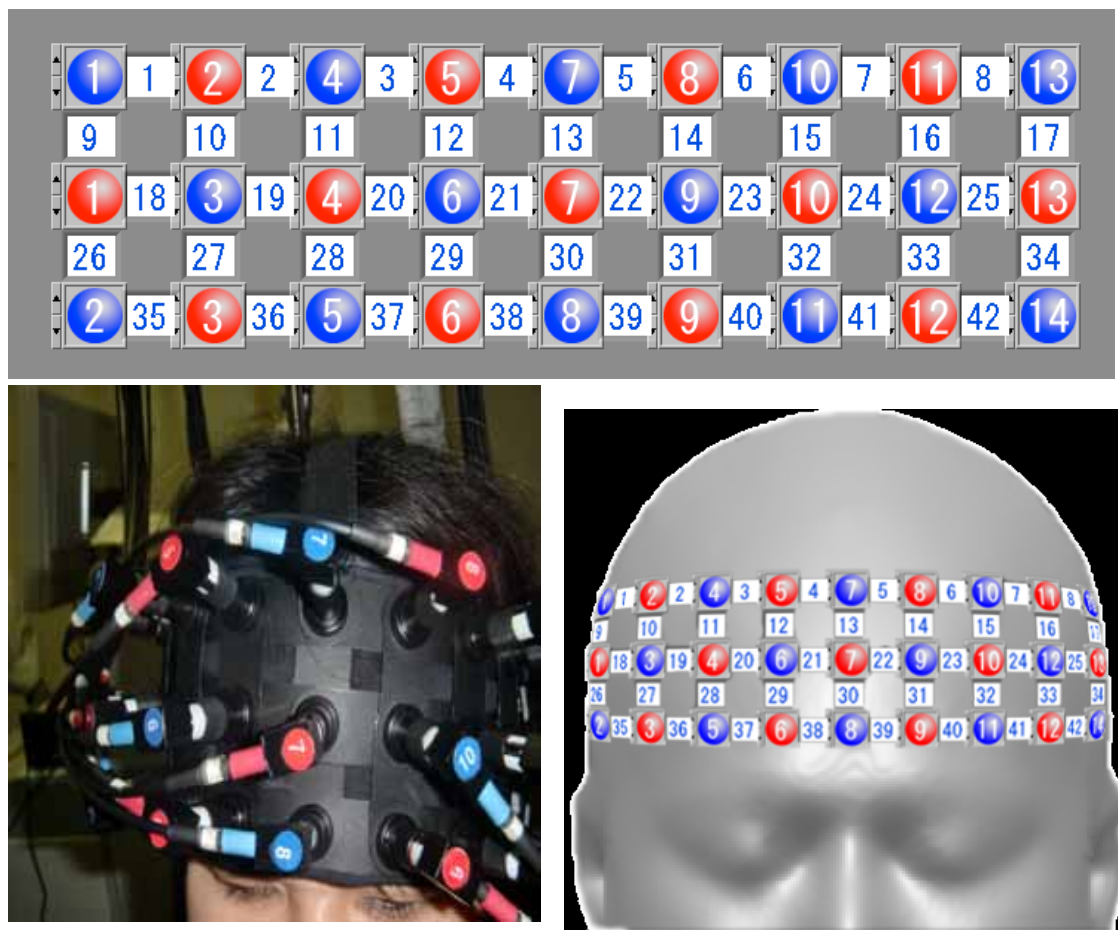


図 1：プローブホルダーと頭部装着イメージ図

fNIRS 機内で oxy-Hb は 42 チャンネル別に fNIRS データとして数列として記録されるのでそのデータを統計ソフトで処理しやすいように Excel file として、音声データは mp3 ファイルとして、ビデオデータは AVCDH (CPI) ファイルとして、頭部写真は JPEG ファイルとして分析用に保存した。またアンケート回答内容、エジンバラ利き手テスト結果、行動データは実験中は所定用紙に手書きで書き込み、その後 Excel にデータ入力を行った。

2.3 . 使用タスク

BST 実験は、タスク開始時直後と終了直前の 30 秒間指でタッピングタスクを行う以外、3 タイプ 6 種類のタスクを連続で実施した。最初はコンピューター (Apple 社 MacBook Pro 17") のモニター上に提示された colour patch の色を言う colour naming タスク、第 2 のタスクは色文字が提示されそれをそのまま読み上げる congruent タスク、最後は色文字提示されそのインク色を言う incongruent タスク (図 2) で、それぞれ日本語と英語版があり、使用言語順による不要な媒介変数を取り除くために、日英版と英日版を作成し、カウンターバランスを取った (図 3)。被験者はスペースバーに常に指を置き、回答後自分のペースで進めるようにした。その為、各被験者のタスク時間や同一被験者内でもタスクにより所要時間が異なった。タスク作成は MicroSoft 社の Power Point2007 を用い、96 ポイントで作成した。各タスクは 20 刺激で構成され、ランダムに提示した。使用色は、黄色・青・緑・黒・赤の 5 色で、日本語タスクでは平仮名で提示し、incongruent タスクのインクの色は黒以外の 4 色を使用した。

colour naming タスク (あか・あお・きいろ・みどり)

--	--	--	--

日本語 congruent タスク (あか・あお・きいろ・くろ・みどり)

あか	あお	きいろ	くろ	みどり
----	----	-----	----	-----

英語 congruent タスク (red, blue, yellow, black, green)

red	blue	yellow	black	green
-----	------	--------	-------	-------

日本語 incongruent タスク (あお・きいろ・みどり・あか・あお)

あか	あお	きいろ	くろ	みどり
----	----	-----	----	-----

英語 incongruent タスク (blue, yellow, green, red, blue)

red	blue	yellow	black	green
-----	------	--------	-------	-------

図 2 : BST 各タスク例と正答

バイリンガルスト룹テスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

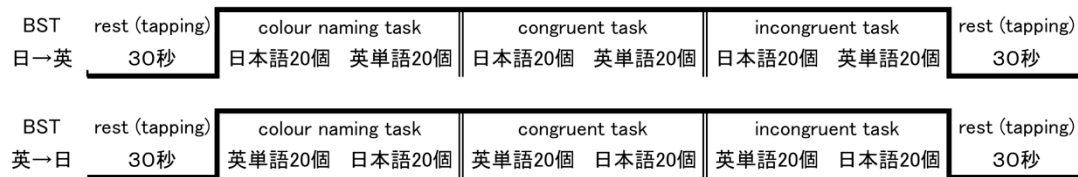


図3：BST ブロックデザイン

2.4．データ分析方法

fNIRS データは、タスク遂行中の 42 チャンネルそれぞれの酸化ヘモグロビン・脱酸化ヘモグロビン・総合ヘモグロビンの変化量として 130 ミリセカンド (0.13 秒) 毎に本体に記録される。この生データは、130 m.s.前の血液中のヘモグロビン濃度と比較した変化量と光路長の積(= fNIRS 値)であり、そのまま被験者間及び被験者内比較に用いることはできず、必ずベースラインデータとの差分を求める必要がある。即ち、ブロックデザインのタスク生データ(の数列)からレスト生データ(の数列)を引いた差分を全タスクの全 42 チャンネルについて算出し、それを被験者内・被験者間比較するのが理想的である。しかし、本研究では連続データ収集方法を採用したために、同じ種類のタスクの最初の言語データをベースラインデータとみなすこととした。さらに全 42 チャンネル全てのデータを対象とするのではなく、本研究目的に合致する脳部位のみを分析対象とした。その際に 6 群それぞれから各 4 名を無作為抽出し、各被験者の fNIRS 値を散布図にして、各群ごとに fNIRS 値のピークを含むように、ベースラインデータを設定した。その後、群構成員全員の差分データを算出後、被験者群平均値を求めて、被験者群間(タスク及び脳部位)比較を行った。以下に、分析対象の脳部位の特定方法とその理由、群間及び群内分析方法を記載する。

2.4.1．行動データ

BST 実験では、color naming・congruent・incongruent の 3 タスクで、2 言語連続で同じタスクが被験者のペースで(スペースバーを押しながら)行われた。その際、脳の 2 部位の賦活状況は fNIRS データの分析でわかるが、同じタスクを遂行するのに費やされた時間と正確さもデータ分析の一助として採用した。更に、早くできても誤りの多いケースや、時間がかかっても正確なケースが観察されることが予想されたので、遂行時間(秒)と正確さ(%)の積も算出することにした。

2.4.2．分析対象 2 脳部位の特定

被験者毎に、実験時の頭部写真(左・右)とビデオ映像を参考にして、(i) 左ブローカ部位周辺の 3 ~ 4 チャンネル(17, 25, 34 チャンネル付近)、() 右のブローカ相当部位周辺 3 ~ 4 チャンネル(9, 18, 26 チャンネル付近)を実験担当者 2 名で特定した。空間分解能が低い fNIRS では Yanagisawa *et al.* (2010) のようにいくつかのチャンネルを結合させて

分析する方法がよく用いられているため、本論でもこの方法を用いることとした。但し、oxy-Hb/deoxy-Hb/total-Hb のトレンドグラフから明らかに外的要因（プローブ外れや頭部の大きな動き等）でドリフトしていると判断できるデータは、そのチャンネルデータを分析対象から除外した。左右ブローカ部位を分析対象とするのは、本研究目的として第 2 言語接触開始年齢と言語賦活部位の関連性を見るためである。

2.4.3 被験者群間比較

BST では、color naming タスク、congruent タスク、incongruent タスクが連続して行われ、且つ、各タスクには 2 言語が含まれていたため、レストタスクのない 6 連続データ収集となった。本研究の主眼は第 2 言語接触年齢と言語賦活部位の関連性なので、color naming タスクは対象外とし、残り 2 タスクに関して、最初の言語での fNIRS データをレストデータ、2 番目の言語での fNIRS データを変化量と捉えた。つまり、日本語・英語順 congruent タスクの場合であれば日本語 congruent fNIRS データをベースラインデータ、英語・日本語順 incongruent タスクであれば英語 incongruent fNIRS データをベースラインデータと見なした。但し BST の特徴として、各被験者のペースでタスクが進行する為、各言語タスクに要した時間が全て異なり、単純に差分を算出できない。そこで、以下の手順で対象データを算出した。

（１）ベースラインデータの特定：第 1 被験者群からランダムに 6 名（言語提示順に 3 名ずつ）を抽出し、言語提示順の同じ無作為抽出された 3 被験者の fNIRS データについて、congruent レスト相当部分・incongruent レスト相当部分（最初の言語でのタスクデータ）を脳 2 部位別に散布図を作成した。散布図を利用して、タスク開始の 5 秒間と終了直前の 5 秒間をできるだけ含めないように留意して（タスク遂行時間が 20 秒未満の場合は含めざるを得なかったが）、ピーク値を含む 10 秒間を特定した。これを同じ言語順でタスクを遂行した第 1 被験者群被験者のベースラインデータとした。同じ作業を第 1 被験者群の、逆の言語順タスク遂行者からの無作為抽出 3 名からに対しても行いベースラインデータとした。第 1 被験者群の 26 人にとっては、同じ言語順のものがベースラインデータとなる。

（２）タスクデータの分析対象時間部分の特定：（１）と同様の作業を、両タスク 2 番目の言語遂行時の fNIRS データについても行い、ピーク 10 秒間の特定を脳 2 部位について行った。これが、同じ被験者群・同じ言語タスク順に属する被験者にとってのタスク代表値を求める 10 秒間である。

（３）変化量の算出：上記（２）で求めたタスク代表 10 秒間の値から（１）で求めたベースラインデータを引いた差分を、2 言語提示別・2 タスク別・2 脳部位別に各被験者毎に算出した。

バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

ベースライン元データ				タスク元データ			
時間	分析対象チャンネル			時間	分析対象チャンネル		
0	-0.148938	-0.028093	-0.01222	0	-0.000102	0.0027461	-0.002854
0.13	-0.039066	-0.015019	-0.014361	0.13	0.0096404	-0.002418	-0.001788
0.26	-0.030076	-0.01531	-0.017969	0.26	0.0054345	0.0011339	0.0131364
2.99	-0.041615	-0.035493	-0.01753	2.99	-0.003795	-0.000652	0.0077174
⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮
31.33	-0.021242	0.0071751	-0.015518	34.71	-0.006547	-0.009224	-0.00021
31.46	-0.050854	0.0156333	-0.011568	34.84	-0.013631	-0.001529	-0.001812
31.59	-0.043261	-0.007402	-0.008068	34.97	-0.012617	-0.016183	0.0017386
31.72	-0.050016	-0.017955	-0.011433	35.1	-0.003588	-0.006857	0.0090834

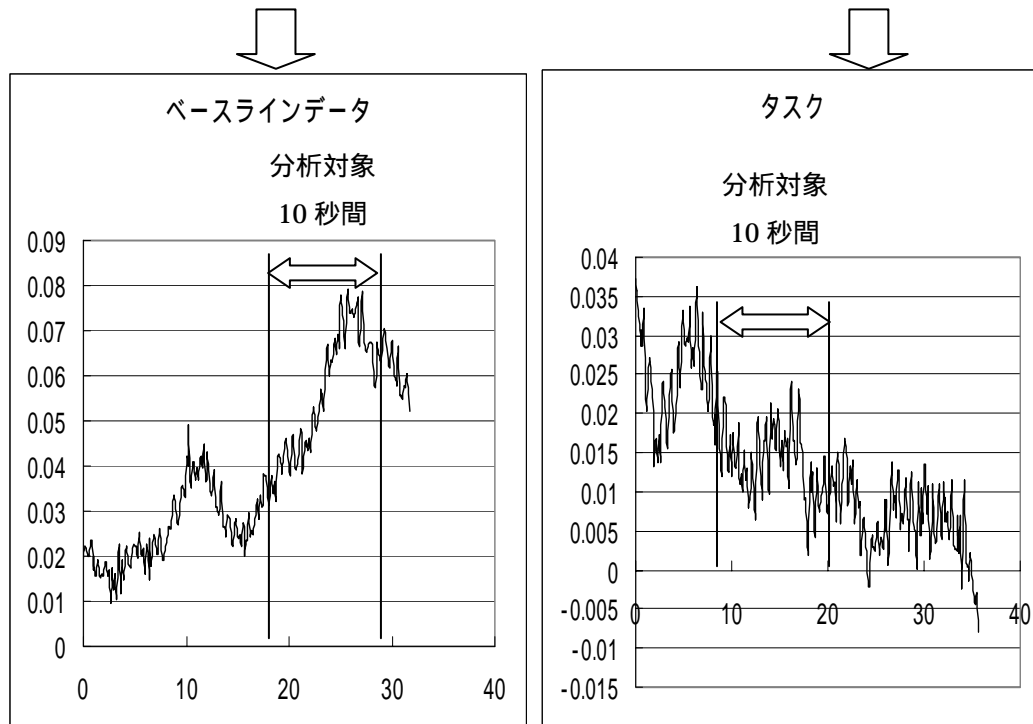


図4 : (1) ~ (3) までの分析手順

(4) 被験者群平均値の算出：上記 (3) で求めた日本語・英語提示順の 19 人について平均値を，英語・日本語提示順の 7 人について被験者群平均値を 2 脳部位別に求めた。

(5) 全被験者群の平均値の算出：上記 (2) ~ (5) の手順を被験者群 2 ~ 6 についても踏んで，被験者群平均値を 2 言語提示順別・2 タスク別・2 脳部位別に算出し，3 元配置の分散分析 (6 被験者群 \times 4 タスク $<$ 2 タスク \times 2 言語提示順 $>$ \times 3 脳部位) で差を統計分析した。主効果が見られた場合は，多重比較 (Bonferroni) を行い，具体的に有意差の

ある被験者群・タスク・脳部位を特定した。また統計分析の結果、Eta Squared も求められた。Eta Squared は 0 から 1 までの間で変化し、0.14 以上であれば効果が大きいとされている。

尚、42 チャンネル全てではなく、特定部位のみを対象とすること、及び対象時間帯を絞り込み代表値として分析する手法は、芋阪 (2010) や Schroeter *et al.* (2002) の例に従った。

2.4.4 各被験者内比較

6 被験者群合計 127 人それぞれの fNIRS データを整理 (タスクデータからベースラインデータを引いた差分を求める) して、被験者内比較をし、被験者群内で平均値を求めるのは膨大な作業量を伴うので、各群から無作為に 6 名 (提示言語順毎に 3 名ずつ) 抽出し、個人内タスク比較を行った。尚、無作為抽出の結果、被験者群によっては群間比較時の 3 名と同じ被験者が抽出された場合もあった。

手順としては、まず、被験者毎にレストタスク相当部分の fNIRS (日英 congruent なら日本語 congruent タスク) データから、グループ間比較時と同様の手法で代表値となる 10 秒間を脳の 2 部位別に特定し、ベースラインデータとした。次に、タスク部分の fNIRS (日英 congruent なら英語 congruent タスク) データから、被験者群間比較時と同様の手法で代表値となる 10 秒間を脳の 2 部位別に特定し、タスクデータとした。このタスクデータからベースラインデータを引いた差分を日英 congruent タスクの英語 fNIRS データとした。日英 incongruent, 英日 congruent, 英日 incongruent に関しても同様に fNIRS データを脳 2 部位それぞれに求める。このようにして求められた 4 タスク (実際には congruent/incongruent の 2 タスクであるが、言語提示順が 2 種類あるので)・2 脳部位別データ (12 列) を繰り返しの分散分析にかけて、個人内タスク比較を行った。有意差があれば、引き続き多重比較 (Bonferroni) を行い、具体的に有意差のあるタスク・脳部位を特定した。この作業を 24 人分 (6 群から 4 人ずつ) 繰り返した。

第 3 章 結果

第 3 章では (1) 行動データのタスク遂行時間と正確さ、(2) fNIRS データの被験者内分析と被験者間分析の結果を述べる。

3.1 行動データ

行動データはタスク遂行時間と正確さ、タスク遂行時間と正答率の積について分析した。タスク遂行時間は 4 タスクについて、正確さとタスク遂行時間と正答率の積については incongruent タスクのみについて実施した。タスク遂行時間は各タスク 20 刺激を言い終わるまでの時間を計測し、また正確さに関しては正答数を刺激数である 20 で割ったものを正答

率とした。

3.1.1 群間比較

(1) タスク遂行時間

タスク遂行時間に関してはどの被験者間においても差は見られなかった (表 2)。

(2) 正答率

正確さに関してもどの被験者間においても差は見られなかった (表 3)。

(3) タスク遂行時間と正答率の積

タスク遂行時間と正答率の積に関して、どの被験者群間でも差はなかった。群間比較に関してはどの観点からの分析でも有意差は見られなかった。このことから、行動データに関して、タスク遂行時間、正答率、さらにタスク遂行時間と正答率の積のいずれの観点においても第 2 言語接触開始年齢による影響はないことが明らかとなった (表 4)。

表 2 : タスク遂行時間結果

被験者群	日本語 congruent			英語 congruent		
	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
1	26	23.88	5.17	26	21.69	5.07
2	18	23.65	5.55	18	23.42	5.87
3	20	24.98	6.73	20	24.30	6.02
4	20	24.30	4.59	20	24.04	4.14
5	17	28.48	7.08	17	26.50	6.42
6	26	24.45	9.39	26	26.07	9.94
	F(5, 121)=1.266, $p<.05$, Eta Squared=.05			F(5, 121)=1.607, $p<.05$, Eta Squared=.062		
被験者群	日本語 incongruent			英語 incongruent		
	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
1	26	31.97	11.04	26	29.09	6.95
2	18	27.80	5.83	18	27.93	7.02
3	20	27.10	5.24	20	27.08	5.53
4	20	28.09	4.09	20	27.26	5.17
5	17	29.98	7.06	17	29.64	6.53
6	26	29.24	9.27	26	29.34	8.82
	F(5, 121)=1.17, $p<.05$, Eta Squared=.046			F(5, 121)=0.53, $p<.05$, Eta Squared=.021		

表 3：正答率結果

日本語 incongruent				英語 incongruent		
被験者群	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
1	26	0.97	0.09	26	0.99	0.02
2	18	1.00	0.01	18	0.99	0.02
3	20	1.00	0.00	20	1.00	0.00
4	20	1.00	0.01	20	1.00	0.00
5	17	1.00	0.01	17	1.00	0.00
6	26	1.00	0.00	26	1.00	0.00
F(5, 121)=1.965, $p<.05$, Eta Squared=.075				F(5, 121)=1.464, $p<.05$, Eta Squared=.057		

表 4：タスク遂行時間と正答率の積の結果

日本語 incongruent				英語 incongruent			
被験者群	数	平均	標準偏差	被験者群	数	平均	標準偏差
1	26	30.81	10.68	1	26	28.83	6.78
2	18	27.71	5.76	2	18	27.72	6.79
3	20	27.10	5.24	3	20	27.08	5.53
4	20	28.02	4.14	4	20	27.26	5.17
5	17	29.88	7.03	5	17	29.64	6.53
6	26	29.24	9.27	6	26	29.34	8.82
F(5, 121)=44.041, $p<.05$, Eta Squared=.003				F(5, 121)=.527, $p<.05$, Eta Squared=.0021			

3.1.2．群内分析

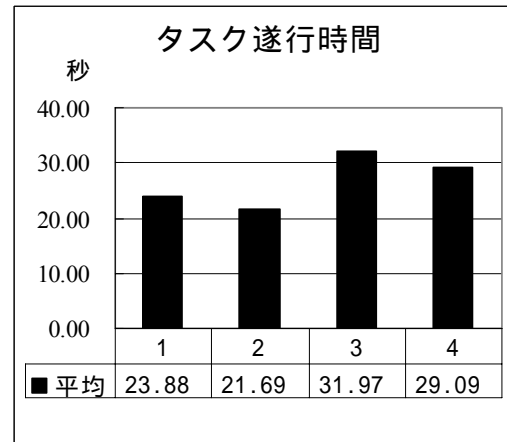
被験者内分析ではタスク間の比較を実施する。便宜上、表では日本語の congruent タスクを 1，英語の congruent タスクを 2，日本語の incongruent タスクを 3，英語の incongruent タスクを 4 と番号をふった。

(1) 第 1 被験者群

第 1 被験者群では、タスク遂行時間に関して、全タスク間（英語 congruent タスク < 日本語 congruent タスク < 英語 incongruent タスク < 日本語 incongruent タスク）で差が見られた。正答率、タスク遂行時間と正答率の積で有意差は見られなかった（表 5）。

表 5：第 1 被験者群行動データ結果

タスク遂行時間			
タスク	数	平均	標準偏差
1	26	23.88	5.17
2	26	21.69	5.07
3	26	31.97	11.04
4	26	29.09	6.95
F(3, 23)=9.681, $p<.05$, Eta Squared=.558			



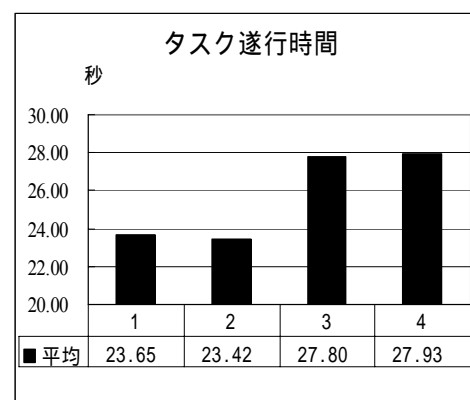
正答率				タスク遂行時間と正答率の積		
タスク	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
3	19	0.96	0.10	26	30.81	10.68
4	19	0.99	0.03	26	28.83	6.78
F(1, 18)=1.785, $p<.05$, Eta Squared=.09				F(1, 25)=2.229, $p<.05$, Eta Squared=.082		

(2) 第 2 被験者群

第 2 被験者群のタスク遂行時間において、日本語 congruent タスクと日本語 incongruent タスク、日本語 congruent タスクと英語 incongruent タスク、英語 congruent タスクと日本語 incongruent タスク（日本語 congruent タスク < 日本語 incongruent タスク、日本語 congruent タスク < 英語 incongruent タスク、英語 congruent タスク < 日本語 incongruent タスク）で差が見られた。しかし、正答率、タスク遂行時間と正答率の積で有意差は見られなかった。

表 6：第 2 被験者群行動データ結果

タスク遂行時間			
タスク	数	平均	標準偏差
1	18	23.65	5.55
2	18	23.42	5.87
3	18	27.80	5.83
4	18	27.93	7.02
F(3, 15)=3.219, $p<.05$, Eta Squared=.392			



バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

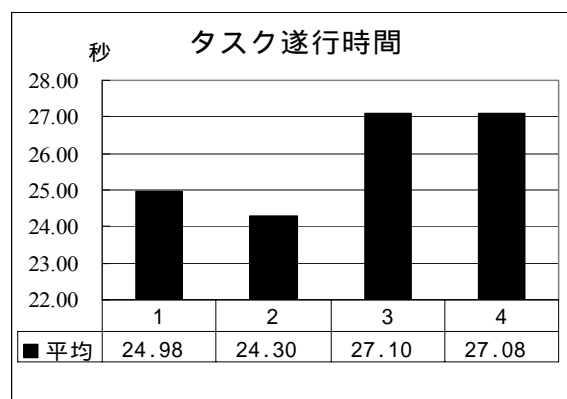
タスク	正答率			タスク遂行時間と正答率の積		
	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
3	18	1.00	0.01	18	27.71	5.76
4	18	0.99	0.02	18	27.72	6.79
	F(1, 17)=1.00, $p<.05$, Eta Squared=.056			F(1, 17)=.001, $p<.05$, Eta Squared=0		

(3) 第 3 被験者群

第 3 被験者群では、英語 congruent タスクと日本語 incongruent タスク、英語 congruent タスクと英語 incongruent タスクのタスク遂行時間でそれぞれ差が見られた（英語 congruent タスク < 日本語 incongruent タスク、英語 congruent タスク < 英語 incongruent タスク）。正答率とタスク遂行時間と正答率の積に関しては、差がみられなかった（表 7）。

表 7：第 3 被験者群行動データ結果

タスク遂行時間			
タスク	数	平均	標準偏差
1	20	24.98	6.73
2	20	24.30	6.02
3	20	27.10	5.24
4	20	27.08	5.53
	F(3, 17)=4.037, $p<.05$, Eta Squared=.416		



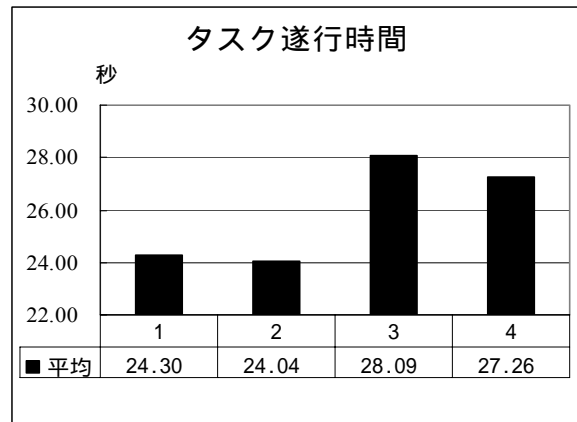
タスク	正答率			タスク遂行時間と正答率の積		
	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
3	20	1	0	20	27.10	5.24
4	20	1	0	20	27.08	5.53
	全員正答率 100 パーセント			F(1, 19)=.001, $p<.05$, Eta Squared=0		

(4) 第 4 被験者群

第 4 被験者群で差が見られたのはタスク遂行時間のみで、全ての congruent タスクと incongruent タスク(日本語 congruent < 日本語 incongruent, 日本語 congruent < 英語 incongruent, 英語 congruent < 日本語 incongruent, 英語 congruent < 英語 incongruent) の比較で差が確認された（表 8）。

表 8 : : 第 4 被験者群行動データ結果

タスク遂行時間			
タスク	数	平均	標準偏差
1	20	24.30	4.59
2	20	24.04	4.14
3	20	28.09	4.09
4	20	27.26	5.17
F(3, 17)=12.983, $p<.05$, Eta Squared=.696			



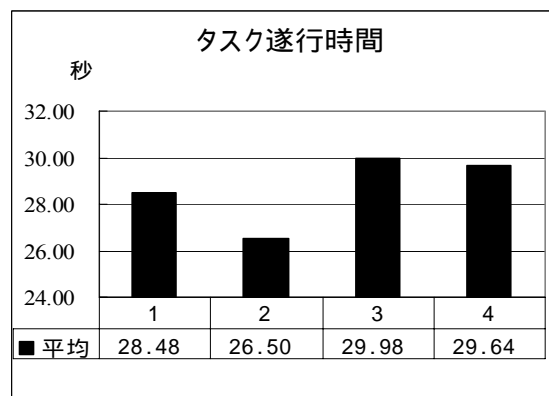
正答率				タスク遂行時間と正答率の積		
タスク	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
3	20	1.00	0.01	20	28.02	4.14
4	20	1.00	0.00	20	27.26	5.17
F(1, 19)=1.00, $p<.05$, Eta Squared=.05				F(1, 19)=.81, $p<.05$, Eta Squared=.041		

(5) 第 5 被験者群

第 5 被験者群では、正答率とタスク遂行時間と正答率の積で差は見られなかったが、タスク遂行時間において、英語 congruent と日本語 incongruent, 英語 congruent と英語 incongruent (英語 congruent < 日本語 incongruent, 英語 congruent < 英語 incongruent) で差が見られた (表 9)。

表 9 : 第 5 被験者群行動データ結果

タスク遂行時間			
タスク	数	平均	標準偏差
1	17	28.48	7.08
2	17	26.50	6.42
3	17	29.98	7.06
4	17	29.64	6.53
F(3, 14)=5.843, $p<.05$, Eta Squared=.556			

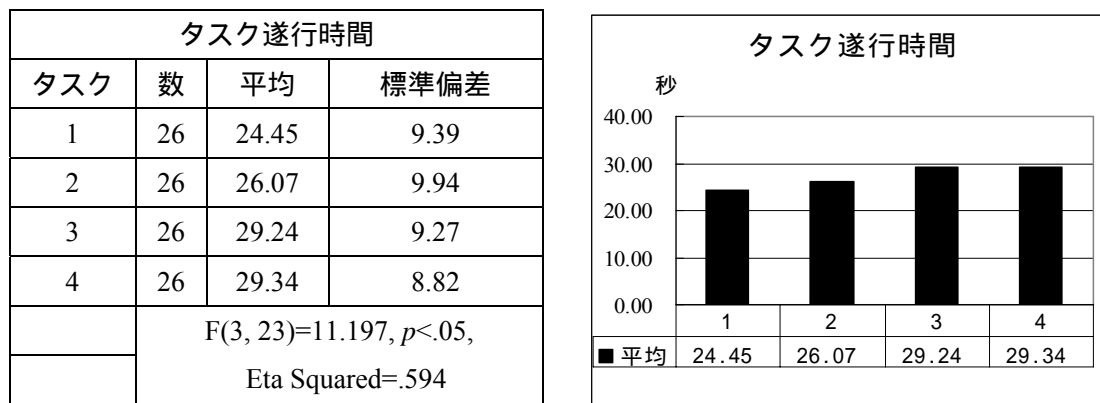


タスク	正答率			タスク遂行時間と正答率の積		
	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
3	17	1.00	0.01	17	29.88	7.03
4	17	1.00	0.00	17	29.64	6.53
	F(1, 16)=1.00, $p<.05$, Eta Squared=.059			F(1, 16)=.145, $p<.05$, Eta Squared=.009		

(6) 第 6 被験者群

第 6 被験者群では、全ての congruent タスクと incongruent タスク（日本語 congruent タスク < 日本語 incongruent タスク, 日本語 congruent タスク < 英語 incongruent タスク, 英語 congruent タスク < 日本語 incongruent タスク, 英語 congruent タスク < 英語 incongruent タスク）でそれぞれ差が見られた（表 10）。

表 10：第 6 被験者群行動データ結果



タスク	正答率			タスク遂行時間と正答率の積		
	数	平均	標準偏差	数	平均	標準偏差
3	26	1.00	0.00	26	29.24	9.27
4	26	1.00	0.00	26	29.34	8.82
	全員正答率 100 パーセント			F(1, 25)=.025, $p<.05$, Eta Squared=.001		

群内比較では、正答率タスク遂行時間と正答率の積に関して有意差は見られなかったが、タスク遂行時間では有意差が見られ、タスク遂行時間では言語間と言語内それぞれでストループ効果が見られた。いずれの被験者群でも congruent タスクよりも incongruent タスクの方がタスク遂行時間が長かったことから、全被験者群で認知的葛藤が見られた結果となった。

3.2 fNIRS データ

fNIRS データは fNIRS 値変化について被験者群内、被験者群間で調べた。タスクを日本語から始めた被験者群 (JE) ではタスク (英語) からレストタスク (日本語) の差分を、英語から始めた被験者群 (EJ) では日本語タスクから英語タスクを引いたものを分析対象値とした。便宜上、表ではタスクに congruentJE を a, congruentEJ を b, incongruentJE を c, incongruentEJ を d と番号をふった。また群間比較の表には、記述統計とともに有意差の有無についての表を提示する。丸印がついている被験者群間では有意差がみられたことを意味する。

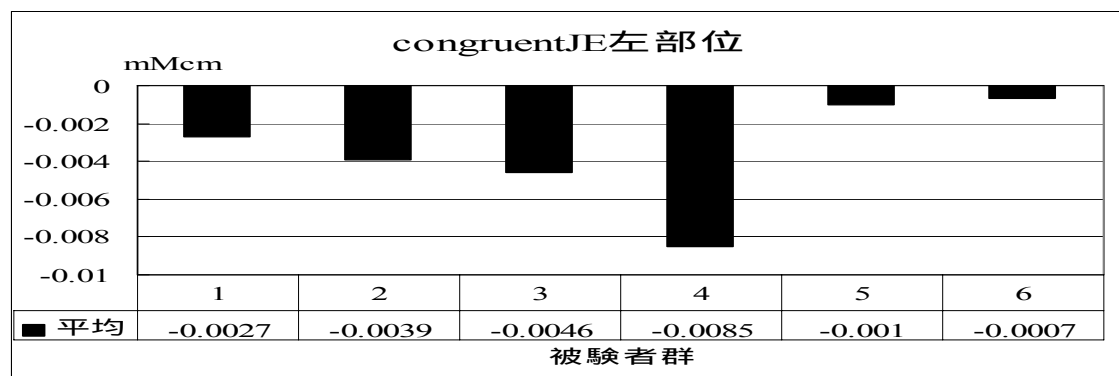
3.2.1 群間比較

(1) congruentJE タスク左部位

congruentJE タスクの左部位では全ての被験者群で fNIRS 値が低下する結果となった (表 11)。

表 11 : congruentJE タスク左部位群間比較結果

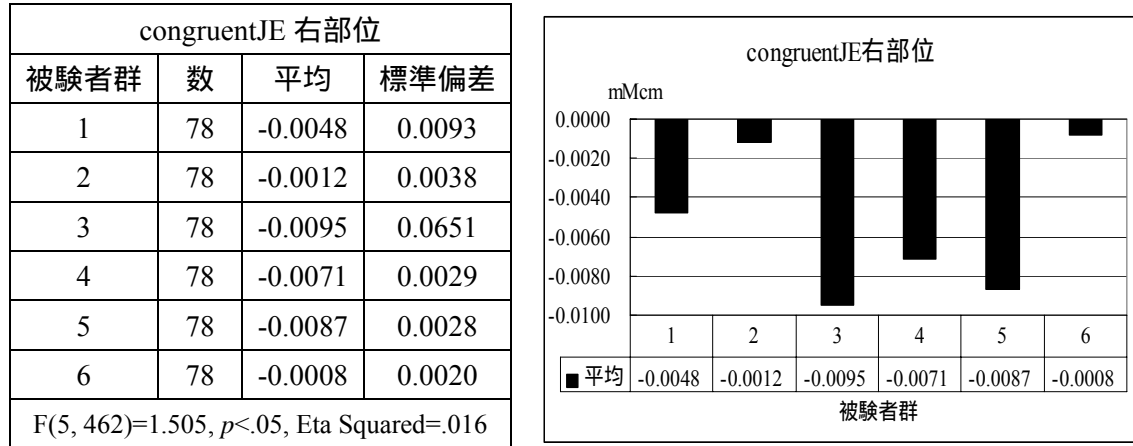
congruentJE 左部位										
被験者群	数	平均	標準偏差		1	2	3	4	5	6
1	78	-0.0027	0.0024	1		N/A				
2	78	-0.0039	0.0037	2	N/A		N/A			
3	78	-0.0046	0.0050	3		N/A				
4	78	-0.0085	0.0034	4						
5	78	-0.0010	0.0027	5						N/A
6	78	-0.0007	0.0025	6					N/A	
F(5, 462)=55.693, $p<.05$, Eta Squared=.376										



(2) congruentJE 右部位

右の分析では、どの被験者群間でも有意差は見られなかった。また全被験者群で fNIRS 値が下がり、左と同じ傾向となった (表 12)。

表 12：congruentJE タスク右部位群間比較結果

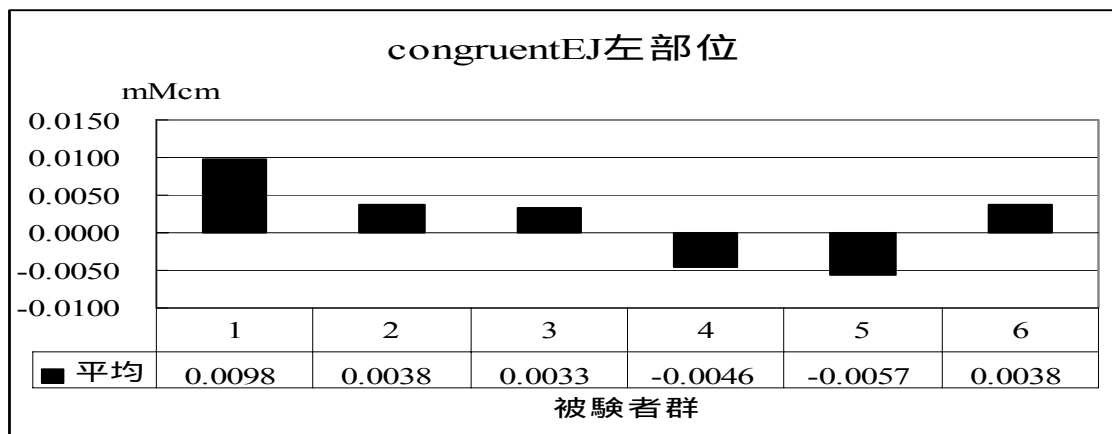


(3) congruentEJ タスク左部位

congruentEJ タスクの左に関しては第 4 被験者群と第 5 被験者群で fNIRS 値が低下したものの、他の 4 群では値が上昇した。また第 1 被験者群は他の意見者群と比較した際にも有意に値が大きかった (表 13)。

表 13：congruentEJ タスク左部位群間比較結果

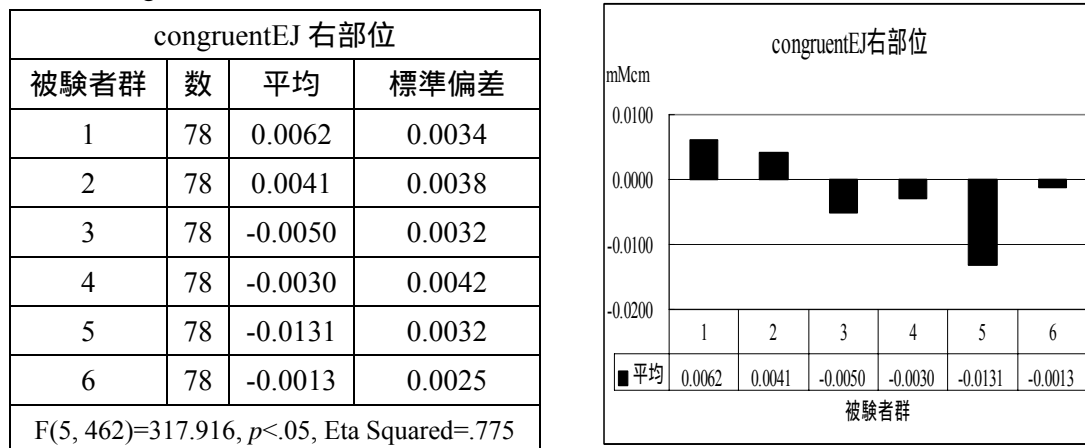
congruentEJ 左										
被験者群	数	平均	標準偏差		1	2	3	4	5	6
1	78	0.0098	0.0031	1		○	○	○		
2	78	0.0038	0.0050	2	○		N/A	○		N/A
3	78	0.0033	0.0043	3	○	N/A		○		N/A
4	78	-0.0046	0.0042	4	○	○	○		N/A	
5	78	-0.0057	0.0062	5	○	○	○	N/A		
6	78	0.0038	0.0050	6	○	N/A	N/A	○		
F(5, 462)=121.054, $p<.05$, Eta Squared=.567										



(4) congruentEJ タスク右部位

congruentEJ タスクの右部位では全ての被験者群間比較で有意差が見られた。第 2 言語接触開始年齢が同じである第 1 被験者群と第 2 被験者群では fNIRS 値が増加したが、他の被験者群では低下する結果となった(表 14)。

表 14 : congruentEJ タスク右部位群間比較結果

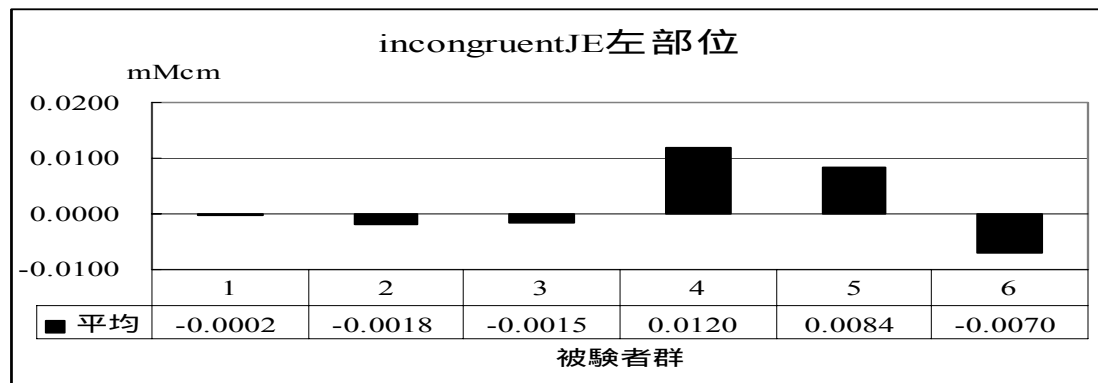


(5) incongruentJE タスク左部位

incongruentJE 左部位の分析では、第 4 被験者群と第 5 被験者群では fNIRS 値が増加したものの、他の 4 群では低下する結果となった。第 4 被験者群は他の被験者群と比較して有意に fNIRS 値が高かった(表 15)。

表 15 : incongruentJE タスク左部位群間比較結果

incongruentJE タスク左部位										
被験者群	数	平均	標準偏差		1	2	3	4	5	6
1	78	-0.0002	0.0005	1		N/A	N/A			
2	78	-0.0018	0.0048	2	N/A		N/A			
3	78	-0.0015	0.0040	3	N/A	N/A				
4	78	0.0120	0.0050	4						
5	78	0.0084	0.0037	5						
6	78	-0.0070	0.0033	6						
F(5, 462)=268.431, $p<.05$, Eta Squared=.744										

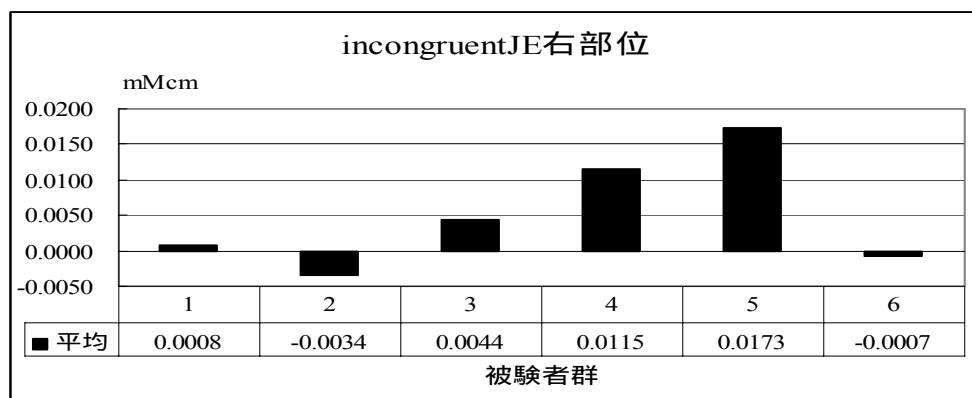


(7) incongruentJE 右部位

incongruentJE の右部位の分析から , 第 2 被験者群と第 6 被験者群で fNIRS 値が低下したことが明らかとなったが , 多くの被験者群間では有意差がないという結果となった(表 16)。

表 16 : incongruentJE タスク右部位群間比較結果

incongruentJE タスク右部位										
被験者群	数	平均	標準偏差		1	2	3	4	5	6
1	78	0.0008	0.0025	1		N/A	N/A	N/A	○	N/A
2	78	-0.0034	0.0042	2	N/A		N/A	○	○	N/A
3	78	0.0044	0.0616	3	N/A	N/A		N/A	○	N/A
4	78	0.0115	0.0024	4	N/A	○	N/A		N/A	○
5	78	0.0173	0.0052	5	○	○	○	N/A		○
6	78	-0.0007	0.0025	6	N/A	N/A	N/A	○	○	
F(5, 462)=7.574, $p<.05$, Eta Squared=.076										

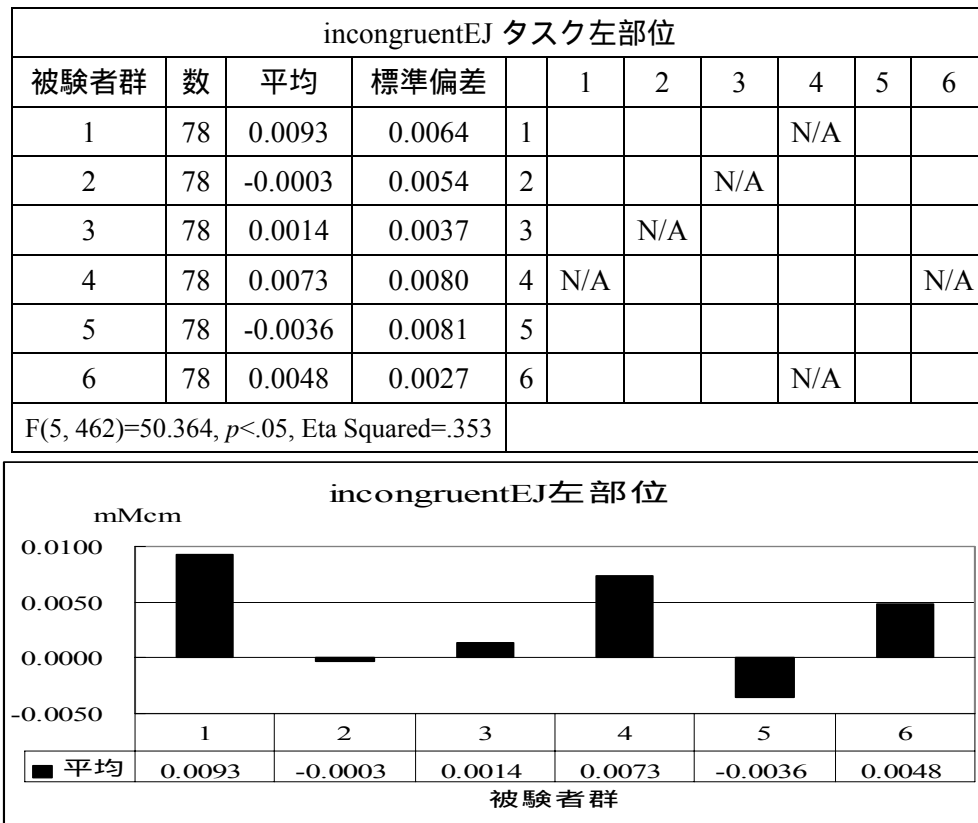


(8) incongruentEJ 左部位

incongruentEJ 左部位では , 第 2 被験者群と第 5 被験者群では fNIRS 値が減少したものの ,

他の被験者群では上昇する結果となった。第 5 被験者群では他の被験者群と比較して、有意に fNIRS 値が低かった（表 17）。

表 17：incongruentEJ タスク左部位群間比較結果



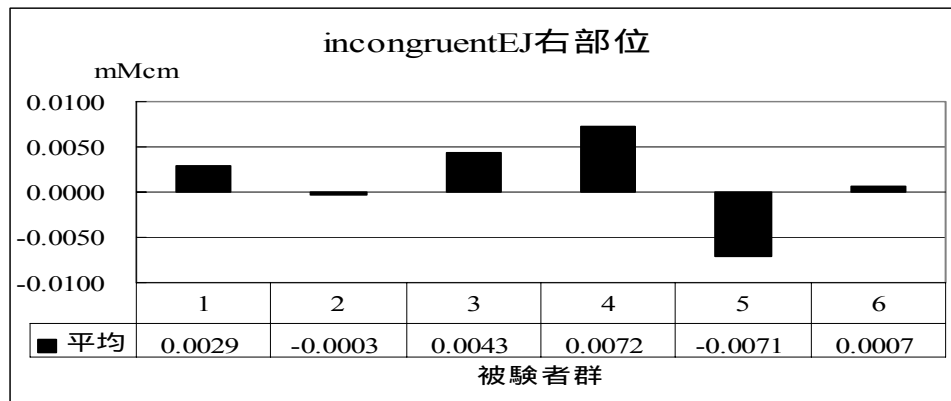
(9) incongruentEJ タスク右部位

incongruentEJ 右部位においては、第 2 被験者群と第 5 被験者群のみで fNIRS 値が下がり、左部位と同じ傾向を示した（表 18）。

表 18：incongruentEJ タスク右部位群間比較結果

incongruentEJ タスク右部位										
被験者群	数	平均	標準偏差		1	2	3	4	5	6
1	78	0.0029	0.0042	1			N/A			N/A
2	78	-0.0003	0.0028	2						N/A
3	78	0.0043	0.0044	3	N/A					
4	78	0.0072	0.0081	4						
5	78	-0.0071	0.0059	5						
6	78	0.0007	0.0030	6	N/A	N/A				

F(5, 462)=73.708, $p<.05$, Eta Squared=.444



群間比較では，congruentJE タスクにおいては，左右両部位で fNIRS 値が全被験者群間で低下するという共通の傾向が見られた。また第 1 被験者群と第 2 被験者群に関して，左右ともに congruentJE タスクでは fNIRS 値が低下したのに対し，congruentEJ タスクでは値が増加する結果となった。よって congruent タスクの脳の賦活には，第 2 言語接触開始年齢による影響がある可能性が示唆された。また incongruentJE タスクの左右両部位で第 1 ～ 3 被験者群で差がなかった。つまり，6 歳で第 2 言語に接触しているかどうかの脳の賦活に影響を与えることが示唆された。したがって，このタスク遂行時の認知的葛藤に関しても，第 2 言語接触開始年齢が関係していると考えられる。

3.2.2 群内比較

群内比較では，タスク内の左右部位の比較（congruentJE タスクの左部位と右部位，congruentEJ タスクの左部位と右部位，incongruentJE タスクの左部位と右部位，incongruentEJ タスクの左部位と右部位）とタスク間の左右それぞれの部位における分析（congruentJE タスク左（または右）部位と incongruentJE タスク左（または右）部位の比較，congruentEJ タスク左（または右）部位と incongruentEJ タスク左（または右）部位の比較，さらに言語とタスク条件の双方が異なる congruentEJ タスクと incongruentEJ タスク，congruentEJ タスクと incongruentEJ タスクの比較も実施した。

(1) 第 1 被験者群

(a) タスク内の左右部位の比較

congruentJE タスクでは fNIRS 値は左右ともに低下したが，congruentEJ タスクでは上昇した。また incongruentEJ タスクでも左右両方で fNIRS 値が増加したため，EJ タスクでは常に fNIRS 値が増加する結果となった。タスク間の左右比較は，congruentJE タスクと incongruentEJ タスクでは右よりも左の方が fNIRS 値が大きく（congruentJE 右部位 < congruentJE 左部位，incongruentEJ 右部位 < incongruentEJ 左部位），congruentEJ タスクでは左よりも右の方が値が大きくなった（congruentEJ 左部位 < congruentEJ 右部位）。また incongruentJE においては，左右で差が見られなかった。

(b) タスク間の左部位の比較

左に関して、条件に関わらず JE タスクでは fNIRS 値が低下したが、EJ タスクでは上昇するという、タスクの言語の順番によって結果が正反対となった。言語内の比較では、JE タスクでは congruent タスクよりも incongruent タスクで値が大きかった (congruentJE < incongruentJE) が、EJ タスクにおいては差が見られなかった。またタスク条件内の比較 (congruent タスクと incongruent タスクの比較) では、congruent タスクでは JE タスクよりも EJ タスクで値が大きくなったが (congruentJE 左部位 < congruentEJ 左部位), incongruent タスクでは差がなかった。さらに言語とタスク条件の双方が異なる congruentJE タスクと incongruentEJ タスク, congruentEJ タスクと incongruentJE タスクのそれぞれを比較すると、いずれも EJ タスクの方が値が大きいという結果となった (congruentJE < incongruentEJ, incongruentEJ < congruentJE)。

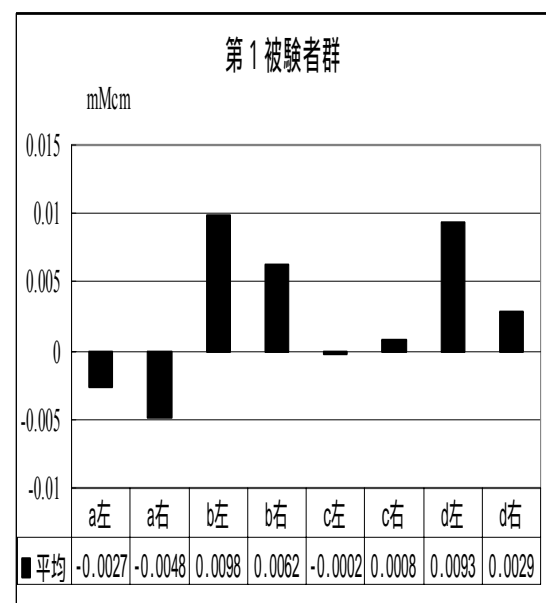
(c) タスク間の右部位の比較

右の分析の結果、fNIRS 値が低下したのは、congruentJE タスクのみであった。言語内の比較では、JE タスクに関して incongruent タスクの方が fNIRS 値が大きかったが (congruentJE < incongruentJE), EJ タスクでは congruent タスクの方が値が大きい (incongruentEJ < congruentEJ) という正反対の結果となった。さらにタスク条件内の比較から、タスク条件に関わらず JE タスクよりも EJ タスクの方が fNIRS 値が大きいことが明らかとなった (congruentEJ < congruentJE, incongruentEJ < incongruentJE)。そして言語とタスク条件の双方が異なる congruentJE タスクと incongruentEJ タスク, congruentEJ タスクと incongruentJE タスクのそれぞれの比較からも JE タスクよりも EJ タスクで値が大きいという結果となった (congruentJE < incongruentEJ, incongruentJE < congruentEJ)。

第 1 被験者群分析をまとめたものが表 19 である。

表 19：第 1 被験者群内分析結果

第 1 被験者群			
タスク,部位	数	平均	標準偏差
a 左部位	78	-0.0027	0.0024
a 右部位	78	-0.0048	0.0093
b 左部位	78	0.0098	0.0031
b 右部位	78	0.0062	0.0034
c 左部位	78	-0.0002	0.0005
c 右部位	78	0.0008	0.0025
d 左部位	78	0.0093	0.0064
d 右部位	78	0.0029	0.0042
F(11, 67)=2.022, $p<.05$, Eta Squared=.971			



(2) 第 2 被験者群

(a) タスク内の左右部位の比較

第 2 被験者群では congruentJE タスクでは fNIRS 値は左右ともに低下したが, EJ タスクでは上昇するという congruent タスクでは, タスクの言語の順番によって, 正反対の結果となった(表 20)。しかし, incongruent タスクでは言語の順番に関わらず左右ともに fNIRS 値が低下した。タスク内の左右の比較において, 差が見られたのは congruentJE タスクのみであった (congruentJE 左部位 < 右部位)。

(b) タスク間の左部位の比較

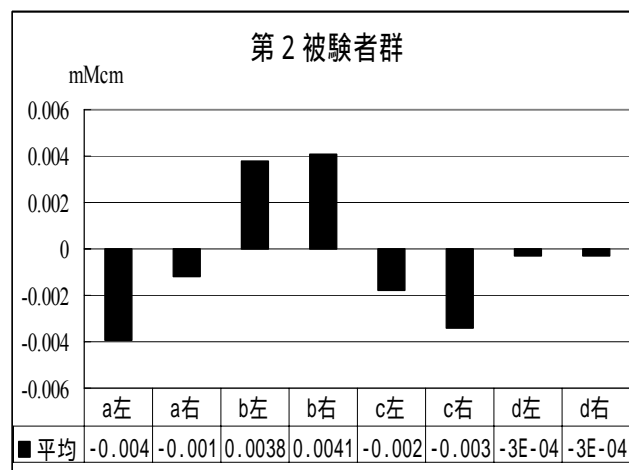
左部位の分析で fNIRS 値が上昇したのは congruentEJ タスクのみであった。また言語内の比較から, JE タスクでは差は見られなかったが EJ タスクでは congruent タスクの方が fNIRS 値が大きかったことが明らかとなった (incongruentEJ < congruentEJ)。タスク条件内の比較では incongruent タスクでは差はなかったが, congruent タスクでは EJ タスクよりも EJ タスクの方が値が大きかった (congruentEJ < congruentJE)。そして言語とタスク条件の双方が異なる congruentJE タスクと incongruentEJ タスク, congruentEJ タスクと incongruentJE タスクのそれぞれの比較からも JE タスクよりも EJ タスクで値が大きいという結果となった (congruentJE < incongruentEJ, incongruentJE < congruentEJ)。

(c) タスク間の右部位の比較

右部位の fNIRS 値が増加したのは congruentEJ タスクのみであった。言語内の比較では, JE タスク EJ タスクともに congruent タスクの方が値が大きくなった (incongruentJE < congruentJE, incongruentEJ < congruentEJ)。タスク条件内の分析では, congruent タスクと incongruent タスク双方で EJ タスクの方が値が大きかった。言語とタスク条件の双方が異なる congruentJE タスクと incongruentEJ タスク, congruentEJ タスクと incongruentJE タスクのそれぞれの比較からも JE タスクよりも EJ タスクで値が大きいという結果となった (congruentJE < incongruentEJ, incongruentJE < congruentEJ)。

第 2 被験者群分析をまとめたものが表 20 である。

表 20：第 2 被験者群内分析結果



第 2 被験者群			
タスク,部位	数	平均	標準偏差
a 左部位	78	-0.0039	0.0037
a 右部位	78	-0.0012	0.0038
b 左部位	78	0.0038	0.005
b 右部位	78	0.0041	0.0038
c 左部位	78	-0.0018	0.0048
c 右部位	78	-0.0034	0.0042
d 左部位	78	-0.0003	0.0054
d 右部位	78	-0.0003	0.0028
F(11, 67)=61.066, $p<.05$, Eta Squared=.909			

(3) 第 3 被験者群

(a) タスク内の左右部位の比較

第 3 被験者群では, congruentJE タスクでは左右ともに fNIRS 値が低下したが, congruentEJ タスクでは左部位は値が上昇し, 右部位では減少した。また incongruentJE タスクでは左は値が低下したものの, 右部位では上昇し, また incongruentEJ では左右両部位で値が増加したことから, 4 タスクそれぞれ全く異なる傾向が見られた。タスク内の左右部位の比較では, congruentJE タスクでは左右の部位で差はなかったが, congruentEJ タスクでは左の fNIRS 値の方が大きい (congruentEJ タスク右部位 < 左部位)。しかし, incongruent タスクでは JE, EJ とともに右の値が大きかった (incongruentJE 左部位 < incongruentJE 右部位, incongruentEJ 左部位 < incongruentEJ 右部位)。

(b) タスク間の左部位の比較

左の分析の結果, congruentJE タスク以外の 3 タスクで fNIRS 値が増加した。言語内比較においては EJ タスクでは差が見られなかったが, JE タスクでは congruent タスクよりも incongruent タスクの方が値が大きかった (congruentJE < incongruentJE)。またタスク条件内の比較では, congruent, incongruent 双方で EJ タスクの方が値が大きかった (congruentJE < congruentEJ, incongruentJE < incongruentEJ)。そして, 言語とタスク条件の双方が異なる congruentJE タスクと incongruentEJ タスク, congruentJE タスクと incongruentEJ タスクのそれぞれの比較では, 常に incongruent タスクの方が値が大きかった (congruentJE < incongruentEJ, congruentEJ < incongruentJE)。

(c) タスク間の右部位の比較

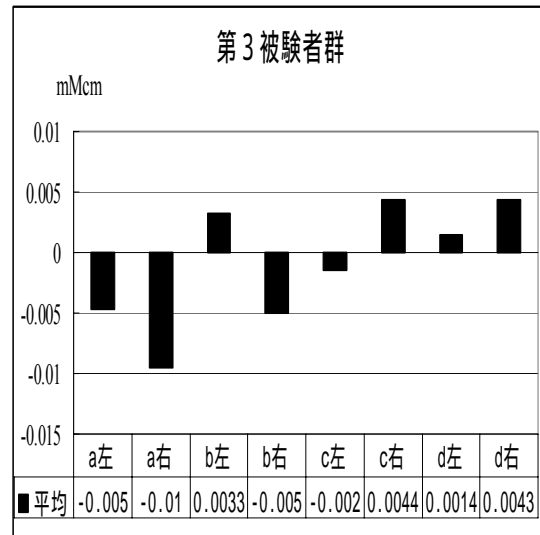
第 3 被験者群における右部位は, congruent タスクでは fNIRS 値が減少し, incongruent タスクでは増加する結果となった。また言語内の比較では JE タスクに有意な差は見られな

ったが，EJ タスクでは incongruent タスクの方が有意に値が大きかった（congruentEJ < incongruentEJ）。タスク条件内の比較と，言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較では，どの比較においても有意差は見られなかった。

第3被験者群分析をまとめたものが表21である。

表21：第3被験者群内分析結果

第3被験者群			
タスク,部位	数	平均	標準偏差
a 左部位	78	-0.0046	0.005
a 右部位	78	-0.0095	0.0651
b 左部位	78	0.0033	0.0043
b 右部位	78	-0.005	0.0032
c 左部位	78	-0.0015	0.004
c 右部位	78	0.0044	0.0616
d 左部位	78	0.0014	0.0037
d 右部位	78	0.0043	0.0044
F(11, 67)=79.17, $p<.05$, Eta Squared=.929			



(4) 第4被験者群

(a) タスク内の左右部位の比較

第4被験者群の左右の分析から，congruent タスクでは左右ともに fNIRS 値が低下し，incongruent タスクでは左右ともに値が増加することが明らかとなった。またタスク内の左右の分析では，どの比較においても有意差は見られなかった。

(b) タスク間の左部位の比較

左部位についてはタスクの言語に関わらず，congruent タスクでは fNIRS 値が低下し，incongruent タスクでは上昇した。よって言語内比較においても JE タスク，EJ タスクの双方で congruent タスクよりも incongruent タスクの方が fNIRS 値が大きかった（congruentJE < incongruentJE，congruentEJ < incongruentEJ）。タスク条件内の比較において，congruent タスクに関しては EJ の方が fNIRS 値が大きかった（congruentJE < congruentEJ）が，incongruent タスクでは差はなかった。言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較においてもタスクの言語の順序に関係なく，incongruent タスクでの fNIRS 値が大きかった（congruentJE < incongruentEJ，congruentEJ < incongruentJE）。

(b) タスク間の右部位の比較

右部位の分析に関しても，タスクの言語の順序の影響を受けず，incongruent タスクでの fNIRS 値が congruent タスクと比較して大きく（congruentJE < incongruentJE，congruentEJ < incongruentEJ），左と同じ傾向が見られた。またタスク条件内の比較において，congruent タ

スクに関しては EJ タスクの方が fNIRS 値が大きかった (congruentJE < congruentEJ) が, incongruent タスクでは差はなかった。また言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較においてもタスクの言語の順序に関係なく, incongruent タスクでの fNIRS 値が大きかった (congruentJE < incongruentEJ, congruentEJ < incongruentEJ)。

第 4 被験者群分析をまとめたものが表 22 である。

表 22：第 4 被験者群内分析結果

第 4 被験者群			
タスク,部位	数	平均	標準偏差
a 左部位	78	-0.0085	0.0034
a 右部位	78	-0.0071	0.0029
b 左部位	78	-0.0046	0.0042
b 右部位	78	-0.003	0.0042
c 左部位	78	0.012	0.005
c 右部位	78	0.0115	0.0024
d 左部位	78	0.0073	0.008
d 右部位	78	0.0072	0.0081
F(11, 67)=4.138, $p<.05$, Eta Squared=.985			

第 4 被験者群

	a左	a右	b左	b右	c左	c右	d左	d右
■ 平均	-0.009	-0.007	-0.005	-0.003	0.012	0.0115	0.0073	0.0072

(5) 第 5 被験者群

(a) タスク内の左右部位の比較

第 5 被験者群では, incongruentEJ タスク左右の両部位のみで fNIRS 値が増加した。congruent タスクではタスクの言語順に関わらず, 右部位よりも左部位での値が大きいという共通の傾向を示した (congruentJE 右部位 < congruentJE 左部位, congruentEJ 右部位 < congruentEJ 左部位)。しかし incongruent タスクでは JE タスクでは左部位よりも右部位の値が大きく, (incongruentJE 左部位 < incongruentJE 右部位), EJ タスクでは右部位よりも左部位の値が大きい (incongruentEJ 右部位 < incongruentEJ 左部位) という正反対の結果となった。

(b) タスク間の左部位の比較

左部位では, incongruentJE タスクのみで fNIRS 値が増加する結果となった。JE タスクに関して, congruent タスクと比較すると incongruent タスクの方が値が大きかったが (congruentJE < incongruentJE), EJ タスク間での比較では有意な差はなかった。また congruent タスク, incongruent タスクそれぞれの比較においては, EJ タスクよりも JE タスクの方が fNIRS 値が大きい (congruentEJ < congruentJE, incongruentEJ < incongruentJE) という共通の結果となった。言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較では, congruentJE タスクと incongruentEJ タスクで差はなかったが, congruentEJ タスクと incongruentJE タスク

の比較では差が見られた (congruentEJ < incongruentJE)。

(c) タスク間の右部位の比較

右の分析結果においても, incongruentJE タスクのみで fNIRS 値が増加するという左と同じ傾向を示した。また言語内の比較では, JE タスクと EJ タスクともに congruent タスクよりも incongruent タスクの方が値が大きいという結果となった (congruentJE < incongruentJE, congruentEJ < incongruentEJ)。タスク条件内の比較では, congruent タスクと incongruent タスクの双方で EJ タスクよりも JE タスクの方が値が大きかった (congruentEJ < congruentJE, incongruentEJ < incongruentJE)。言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較では, congruentJE タスクと比較して incongruentEJ タスクの方が値が大きかった (congruentJE < incongruentEJ) が, congruentEJ タスクと incongruentJE タスクの比較では有意差がなかった。

第 5 被験者群分析をまとめたものが表 23 である。

表 23：第 5 被験者群内分析結果

第 5 被験者群			
タスク,部位	数	平均	標準偏差
a 左部位	78	-0.001	0.0027
a 右部位	78	-0.0087	0.0028
b 左部位	78	-0.0057	0.0062
b 右部位	78	-0.0131	0.0032
c 左部位	78	0.0084	0.0037
c 右部位	78	0.0173	0.0052
d 左部位	78	-0.0036	0.0081
d 右部位	78	-0.0071	0.0059
F(11, 67)=4.079, $p<.05$, Eta Squared=.985			

第 5 被験者群								
mMcm								
	a左	a右	b左	b右	c左	c右	d左	d右
■ 平均	-0.001	-0.009	-0.006	-0.013	0.0084	0.0173	-0.004	-0.007

(6) 第 6 被験者群

(a) タスク内の左右部位の比較

JE タスクでは左右両方の部位で fNIRS 値が減少したが, EJ タスクで fNIRS 値が低下したのは congruentEJ タスクの右部位のみであった。また EJ タスクでは左右の部位を比較すると, 左の部位の方が有意に値が大きかった (congruentEJ 右部位 < congruentEJ 左部位, incongruentEJ 右部位 < incongruentEJ 左部位)。一方 congruentJE タスクでは左右で有意差はなかったが, incongruentEJ では左部位が右部位よりも値が大きかった (incongruentJE タスク左部位 < incongruentJE タスク右部位)。

(b) タスク間の左部位の比較

左部位の分析では, EJ タスクでは常に fNIRS 値が減少したのに対し, JE タスクでは値が

増加するという言語間で正反対の結果となった。また言語内比較では incongruent タスクよりも congruent タスクの値が大きかった ($\text{incongruentJE} < \text{congruentJE}$) が、EJ タスクでは incongruent タスクで値が大きかった ($\text{congruentEJ} < \text{incongruentEJ}$) という JE タスクと EJ タスクで正反対の傾向を示した。またタスク条件内での比較では、いずれの場合も EJ タスクの方が値が大きかった ($\text{congruentJE} < \text{congruentEJ}$, $\text{incongruentJE} < \text{incongruentEJ}$)。言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較では、いずれの場合も incongruent タスクの方が値が大きい ($\text{congruentJE} < \text{incongruentEJ}$, $\text{congruentEJ} < \text{incongruentJE}$) ということが明らかとなった。

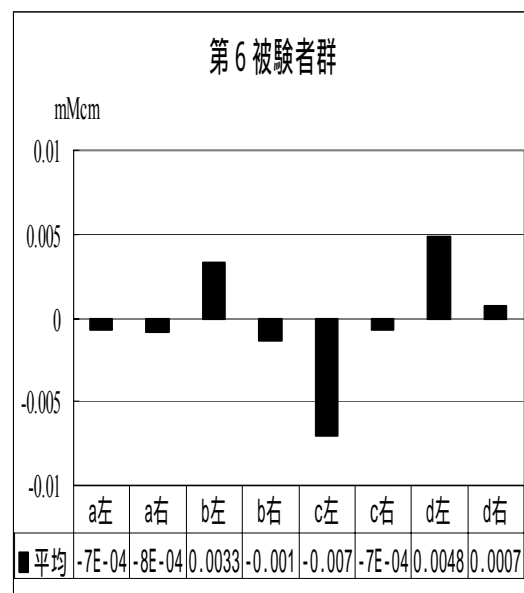
(c) タスク間の右部位の比較

第6被験者群の分析における右部位では、incongruentEJ 右のみで fNIRS 値が増加した。JE タスクの比較では差がなかったが、EJ タスクでは congruent タスクよりも incongruent タスクの方が値が大きい結果となった (congruentEJ < incongruentEJ)。またタスク条件内の比較からは、いずれの場合も JE タスクより EJ タスクの方が値が大きいという結果となった (congruentJE < congruentEJ, incongruentJE < incongruentEJ)。また言語とタスク条件の双方が異なるタスクの比較では、congruentEJ タスクと incongruentJE タスクで差は見られなかったが、congruentJE タスク と incongruentEJ タスクの比較では差が見られた (congruentEJ < incongruentEJ)。

第 6 被験者群分析をまとめたものが表 24 である。

表 24：第 6 被驗者群內分析結果

第 6 被験者群			
タスク,部位	数	平均	標準偏差
a 左部位	78	-0.0007	0.0025
a 右部位	78	-0.0008	0.002
b 左部位	78	0.0033	0.0025
b 右部位	78	-0.0013	0.0025
c 左部位	78	-0.007	0.0033
c 右部位	78	-0.0007	0.0025
d 左部位	78	0.0048	0.0027
d 右部位	78	0.0007	0.003
F(10, 68)=94.677, $p<.05$, Eta Squared=.933			



群内比較から以下のことが明らかとなった。第1被験者群ではEJタスクで常にfNIRS値が増加し、JEタスクとEJタスクの比較では常にEJタスクの方がfNIRS値が大きくなるという結果となった。またこの結果に関しては、第2被験者群でも同じだった。第3被験者

群で左右の部位を比較すると, incongruent タスクでは常に左部位よりも右部位の方が値が大きかった。また左部位のタスク間の比較では, 常に EJ タスクの方が fNIRS 値が大きかったのに対し, 右部位では有意差は見られなかった。第 4 被験者群では, congruent タスクでは常に左右両部位ともに fNIRS 値が減少したのに対し, incongruent タスクでは両部位で上昇した。この際タスク内の左右部位の比較では, どの比較においても差がなかったが, 右部位は常に EJ タスクの方が JE タスクよりも fNIRS 値が大きいという結果となった。第 5 被験者群で左右それぞれの部位の比較では, EJ タスクよりも JE タスクの方が常に値が大きいという結果となったのに対し, 第 6 被験者群では左右それぞれの比較では JE タスクよりも EJ タスクの方が常に fNIRS 値が大きいという正反対の結果となった。

第 4 章 考察

第 4 章では, データ分析の結果 (第 3 章) をもとに行動データと fNIRS データの考察を行う。

4.1 行動データ

行動データに関してはタスク遂行時間, 正答率, さらにこれらの積に関してそれぞれ群内と群間比較の双方に関して考察する。

4.1.1 群間比較

(1) タスク遂行時間

タスク遂行時間の分析ではどのタスクにおいても被験者群間で差がなかった。よって, 本研究の結果からは第 2 言語接触開始年齢がタスク遂行時間に影響を及ぼさない可能性が示唆された。苧阪 (1990) では, ある言語の習熟度があがるにつれて, incongruent タスクで反応時間が長くなるため, BST が言語の習得レベルを測定する 1 つの指標となると述べられている。よって本研究では第 2 言語接触開始年齢は言語の習熟度に影響を与えないという可能性が示唆され, 臨界期仮説とは矛盾する結果となった。

(2) 正答率

incongruent タスクのみで実施した正答率の比較では, 日本語, 英語の両言語ともに, どの被験者群間でも正答率に有意差は見られなかった。

(3) タスク遂行時間と正答率の積

正答率と同様に incongruent タスクのみタスク遂行時間と正答率の積では, どの被験者群間でも差異はみられなかった。

群間比較においてはタスク遂行時間と正答率, タスク遂行時間と正答率の積のいずれの分析においても有意差は見られなかった。このことから, バイリンガルストループテスト

の行動データに関しては第 2 言語接触開始年齢は重要な要因とはならないと考えられる。またタスク遂行時間で有意差が見られなかったことから、第 2 言語接触開始年齢は言語の習熟度に影響を及ぼさないことが示唆され、臨界期仮説とは矛盾する結果となった。

4.1.2 群内比較

(1) 第 1 被験者群

第 1 被験者群のタスク遂行時間では、全てのタスク間で有意差があった（英語 congruent タスク < 日本語 congruent タスク < 英語 incongruent タスク < 日本語 incongruent タスク）。よって言語間、言語内の双方においてストループ効果が見られた。正答率において、有意差はみられなかったが、日本語 incongruent タスクにおいては、26 人中 5 人が言い間違いをしたが、そのうちの 1 人は正答率が 60 パーセントと非常に低かった。一方、英語 incongruent タスクでは正答率が 95 パーセントが 2 人、90 パーセントが 1 人いた。2 タスクとも正答率が 100 パーセントだった人は 19 人と全体のおよそ 70 パーセントであったため、正答率には個人差があることが明らかとなった。

(2) 第 2 被験者群

第 2 被験者群においては正答率とタスク遂行時間と正答率の積それぞれの比較で差は見られなかった。しかしタスク遂行時間では日本語 congruent タスクと 2 言語の incongruent タスク、英語 congruent タスクと日本語 incongruent タスクの比較においてそれぞれ有意差が見られた（日本語 congruent < 日本語 incongruent, 日本語 congruent < 英語 incongruent, 英語 congruent < 日本語 incongruent）。日本語では言語内のストループ効果が見られた一方で、英語では見られなかった。言語の習得レベルにしたがってストループ効果が増大することから（苧阪, 1994）、第 2 被験者群では日本語が優勢言語である可能性が示唆された。

(3) 第 3 被験者群

第 3 被験者群でも正答率とタスク遂行時間と正答率の積の比較で有意差は見られなかった。しかしタスク遂行時間では英語 congruent タスクと 2 言語の incongruent タスクにおいてそれぞれ有意差が見られた（英語 congruent < 日本語 incongruent, 英語 congruent < 英語 incongruent）。また第 2 被験者群とは反対に、英語でのみ言語内のストループ効果が見られた。よって本研究の第 3 被験者群の優勢言語は英語である可能性が示唆された。

(4) 第 4 被験者群

第 4 被験者群ではタスク遂行時間のみで有意差が見られた。congruent タスクと incongruent タスクでのタスク条件間の比較で差があった（日本語 congruent < 日本語 incongruent, 日本語 congruent < 英語 incongruent, 英語 congruent < 日本語 incongruent, 英語 congruent < 英語 incongruent）。第 4 被験者群では日本語と英語の両言語で言語内、言語間のストループ効果が見られた。

(5) 第 5 被験者群

第 5 被験者群の行動データの分析で差が見られたのは、タスク遂行時間の英語 congruent

と日本語 incongruent, 英語 congruent と英語 incongruent (英語 congruent < 日本語 incongruent, 英語 congruent < 英語 incongruent) であった。日本語の congruent タスクと incongruent タスクの比較において有意差が見られなかったことから, 日本語に関して高度な自動化が進んでいない可能性が示唆された。この理由として, 第 5 被験者群には日本語を第 2 言語とする被験者が 17 人中 4 人と, 他の被験者群よりも多かったことが考えられる。また英語に関しては有意に言語内のストループ効果が見られたことから, 英語が優勢言語となっていることを裏付ける結果となった。

(6) 第 6 被験者群

第 6 被験者群では第 4 被験者群と同様に, congruent タスクと incongruent タスクでの条件間の比較では有意差が見られた。よって英語圏滞在経験がない, あるいは半年未満であっても母語と第 2 言語の両言語で言語内, 言語間でストループ効果が見られた。このことから, 第 2 言語である英語に関しても自動化が進んでいる可能性が示唆された。正答率, タスク遂行時間と正答率に関して有意差は見られなかった。

被験者群内分析では正答率とタスク遂行時間と正答率の積に関してはどの被験者群内においても差は見られなかった。しかしタスク遂行時間に関しては被験者群それぞれに差があった。しかし, いずれの被験者群内においても congruent タスクよりも incongruent タスクの方が遅い結果となり, この結果は Ravnkilde *et al.* (2002) と一致する。また生前から第 2 言語に接し, その環境が現在でも続いている第 1 被験者群と英語圏滞在経験がない, あるいは半年未満である第 6 被験者群の双方で日本語と英語双方で言語内, 言語間でのストループ効果が見られたことから, BST から測定できる言語の習熟度に関しては差異がない可能性があり, 臨界期仮説と相反する結果となった。

4.2 fNIRS データ

fNIRS データの分析は以下の観点から考察していく。まず群間比較では 4 条件それぞれ 2 部位について考察していく。また群内比較では, これまでの先行研究で分析されてきた同一言語タスク遂行における左右部位の比較, タスク間の左と右のそれぞれの部位の比較を行う。また本研究で対象としている左部位には言語野の 1 つで, 主に言語産出の役割を担っているとされているブローカ野が含まれている。また Schroeter *et al.* (2002) で言語内のストループ効果に関係があるとされている lateral prefrontal cortex の FC 3 が左部位に, FC 4 が右に含まれる。

4.2.1 群間比較

(1) congruentJE タスク左部位

congruentJE タスクの比較では全被験者群で fNIRS 値が低下した。また第 1 被験者群と第 2 被験者群との比較, さらに第 5 被験者群と第 6 被験者群との比較で有意差が見られなかった。ことから, 日本語から英語にスイッチする際には第 2 言語接触開始年齢が同じであ

れば、脳の賦活はその後の言語環境に左右されない可能性が示唆された。よってこの結果は、第2言語接触開始年齢が言語野があるとされている（本研究ではブローカ野のみ）左脳の賦活に影響を与えたとした Kim *et al.* (1997) と一致する。しかし、大石・木下 (2008) では母語と比較して第2言語の方が言語野の賦活が大きくなることが明らかになっているが、ほとんどの被験者の母語が日本語である第6被験者群においても fNIRS 値が低下しているため矛盾した結果となった。

(2) congruentJE タスク右部位

congruentJE 右部位の分析に関して、全被験者群で fNIRS 値が低下し、どの被験者群間でも有意差は見られなかった。これまでの先行研究で言語に関係する右半球の機能として、韻律やピッチといった音韻や音声処理が挙げられている (Homae *et al.* (2006), Johnsrude *et al.* (2000), Meyer *et al.* (2004), Zatorre *et al.* (1992))。しかし、本研究ではリスニングタスクは実施していないため、右部位の fNIRS 値の増加を引き起こすとは考えにくい。よって全被験者群で有意差がなかったと考えられる。

(3) congruentEJ タスク左部位

congruentEJ タスクの左部位では第4被験者群と第5被験者群では fNIRS 値が低下したものの、他の被験者群では増加した。第1被験者群では他の被験者群と比較して有意に fNIRS 値が大きかった。よって、生前からずっと第2言語に接していると、英語から日本語に言語が切り替わったときに左部位が大きく賦活することが明らかとなった。

(4) congruentEJ タスク右部位

congruentEJ タスクの右部位の分析において、fNIRS 値が上昇したのは第2言語接触開始年齢が同じである第1被験者群と第2被験者群のみであった。よって英語から日本語に言語産出を切り替える際の脳の賦活には第2言語接触開始年齢が1つの要因となりうるということが明らかとなった。

(5) incongruentJE タスク左部位

incongruentJE タスクの左部位では、第1被験者群と第2被験者群、第3被験者群で差はなかった。よって incongruent タスクで日本語から英語に切り替わった際の脳の賦活には3歳から小学校入学前に第2言語に接触するかどうかが要因の1つになりうるということが分かった。加えて第6被験者群では他の被験者群と比較して有意に fNIRS 値が低かったことから、英語圏滞在歴の有無も要因となりうる。

(6) incongruentJE タスク右部位

incongruentEJ タスク右部位では、差の有無が第2言語接触開始年齢と関係がなかったため、脳の賦活に与える影響はない可能性がある。また congruentJE タスクの右部位の分析でも、第2言語接触開始年齢は脳の右部位に影響を与えないことが示唆されている。このことからタスク条件に関わらず、日本語から英語に言語スイッチする際の脳の右部位の賦活に関しては、第2言語接触開始年齢は影響しないと考えられる。

(7) incongruentEJ タスク左部位

incongruentEJ タスク左部位の被験者群間比較では、第 5 被験者群の fNIRS 値が顕著に低いことが挙げられる。第 5 被験者群は第 2 言語接触開始年齢が 16 歳以降と遅い遅延バイリンガルであるが、英語を母語とする被験者が多かったのが要因であると考えられる。

(8) incongruentEJ タスク右部位

incongruentEJ タスクの右部位の fNIRS 値は、第 4 被験者群で最も高く、第 5 被験者群で最も低かった。よって英語を母語とする被験者の場合、incongruentEJ タスクでは fNIRS 値が低下することが明らかとなった。

4.2.2 群内比較

(1) 第 1 被験者群

第 1 被験者群では、congruentJE タスクでは左と右で有意差は確認されなかったが、congruentEJ タスクでは右よりも左が有意に賦活した。これは早期に獲得して言語であれば言語が 1 つでも 2 つでも脳の賦活が等しくなるという先行研究 (Kim *et al.* (1997), 入来 (2008)) とは一致しない。そして congruentEJ タスクで左の fNIRS 値が有意に大きかったことは、英語よりも日本語の方が自動化が進んでいると考えられる (大石, 2006)。また JE タスクでは常に左の濃度が低下したのに対し、EJ 条件では上昇したことから、第 1 被験者群では日本語から英語に言語スイッチするよりも、英語から日本語にスイッチする方が左部位の賦活が大きいことも言語の自動化の可能性を示唆する。また congruent タスクと incongruent タスクの比較によるストループ効果の分析では、JE タスクの左部位では congruent タスクよりも incongruent タスクで fNIRS 値が大きかった。この結果は母語のみをタスクとしたストループ効果を見た先行研究 (Schroeter *et al.* (2004)) と一致しており、認知的葛藤があったと考えられる。

(2) 第 2 被験者群

第 2 被験者群では congruentJE タスクの左と右では両方濃度が低下し、右部位よりも左部位で低下したが、congruentEJ タスクにおいては左右の比較で有意差は見られなかった。言語間の比較では congruentJE タスクの左部位では濃度が低下したのに対し、congruent EJ タスクの左部位では濃度が上昇し、この傾向は右の部位に関しても同じだった。このことから日本語から英語へ言語スイッチするよりも、英語から日本語にスイッチする場合にブローカ野が賦活することが明らかとなったが、congruent タスクからは 2 言語ともに左脳優位ではないことが明らかとなった。またストループ効果に関しては JE タスクの左部位と EJ タスクの左右で有意差が見られた。よってストループ効果に関する脳反応は日本語と英語で異なることが明らかとなった。

(3) 第 3 被験者群

第 3 被験者群では congruentJE タスクに関して左右の比較で有意差は見られなかったが、congruentEJ 条件で有意差が確認された (右部位 < 左部位)。よって英語から日本語へのスイッチに関しては左脳優位である。また右部位におけるタスク条件内の比較では JE タス

クと EJ タスク間で有意差がなかったのに対し、左では congruent タスクと incongruent タスク双方で EJ タスクの方が左部位の fNIRS 値が大きかったこと（左部位；congruentJE < congruentEJ，incongruentJE < incongruentEJ）から日本語から英語にスイッチするよりも英語から日本語にスイッチする方が左脳優位となることが明らかとなった。またストループ効果に関しては、左部位よりも右部位の方が fNIRS 値が大きく、Schroeter *et al.* (2004) と矛盾する結果となった。

(4) 第 4 被験者群

第 4 被験者群では、言語に関係なく congruent タスクでは左右の fNIRS 値が低下し、incongruent タスクでは増加した。よってタスク遂行時間が長くなると fNIRS 値が大きくなるという行動時間と fNIRS データで相関関係があることが明らかとなり、この結果は Schroeter *et al.* (2002) と一致する。またタスク内の左右部位の比較では、4 タスクのいずれにおいても有意差がなかった。congruent タスクにおいても左部位と右部位で差がなかったことから、第 4 被験者群では日英両言語において左脳優位ではないことが明らかとなった。大石 (2006) では脳の左右の活性度に有意差が認められない要因として習熟度が低いことが挙げられている。ゆえに、第 4 被験者群では習熟度は高くないが、2 言語の運用能力が同等である可能性が示唆された。

(5) 第 5 被験者群

第 5 被験者群では、congruent タスクの JE と EJ 両タスクにおいて左の方が fNIRS 値が大きかったことから、日英語の両言語で左脳優位となり、2 言語に関して習熟度が高いことが明らかとなった。また JE タスクでは、ストループ効果によって lateral prefrontal cortex の脳の賦活が大きくなるという Schroeter *et al.* (2002) と同じ結果となったが、EJ タスクの左部位における congruent タスクと incongruent タスクで有意差がなかったため、この先行研究と矛盾する結果となった。

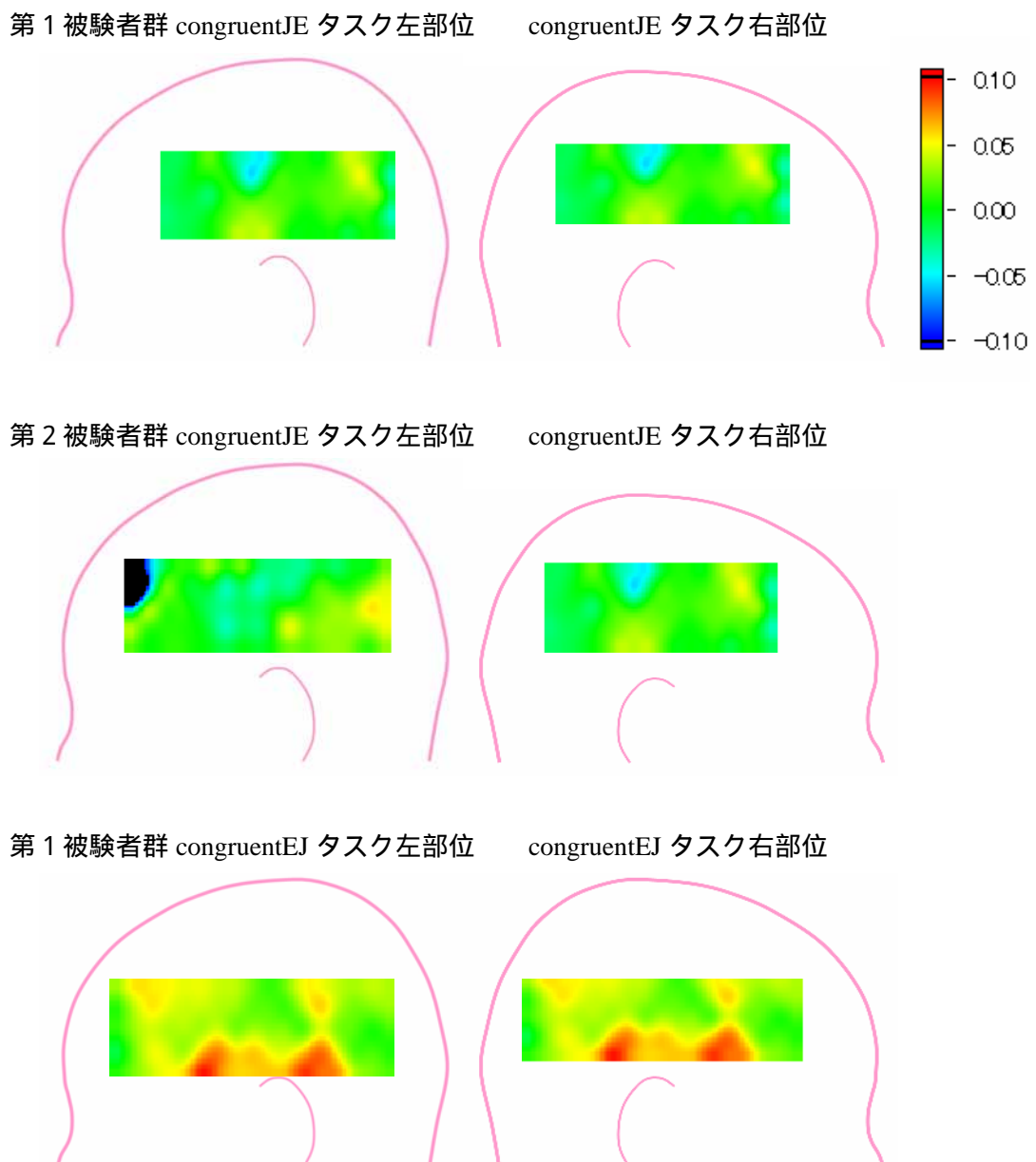
(6) 第 6 被験者群

第 6 被験者群では congruentEJ タスクでは左脳優位となったが、congruentJE タスクにおいては左右の部位で有意差は見られなかった。よって日本語から英語にスイッチする際には十分な自動化が進んでいない可能性がある。またストループ効果に関して、JE タスクに関して、左部位では congruent タスクで fNIRS 値が大きくなり（incongruentJE 左部位 < congruentJE 左部位）、また右部位では congruent タスクと incongruent タスクで有意差が見られなかったことから、Schroeter *et al.* (2002) の結果と矛盾している。しかし、EJ タスクでは左右部位で共通して congruent タスクよりも incongruent タスクの方が fNIRS 値が大きかったことから Schroeter *et al.* (2002) と同様に被験者に認知的葛藤があったと考えられる。

4.3 総合考察

本研究結果では、fNIRS データの群間分析と群内分析の結果から、提示された文字を読む（=congruent タスク）際には生前から第 2 言語に接触していれば、その後の環境に関係なく

脳の賦活が等しくなることが分かった。特に日本語から英語にスイッチする際の左部位の賦活に関して第1被験者群と第2被験者群で差がなかったことから、左右それぞれの脳部位の賦活傾向だけでなく、その賦活の程度まで同等となることが分かった（図5）。この他の被験者群では共通の傾向が見られなかったため、生前から第2言語に接しているかが脳の賦活に影響を与えることとなり、従来の臨界期仮説で言われているような思春期前後や10歳頃が影響を与えるということとは矛盾する結果となった。



第 2 被験者群 congruentEJ タスク左部位 congruentEJ タスク右部位

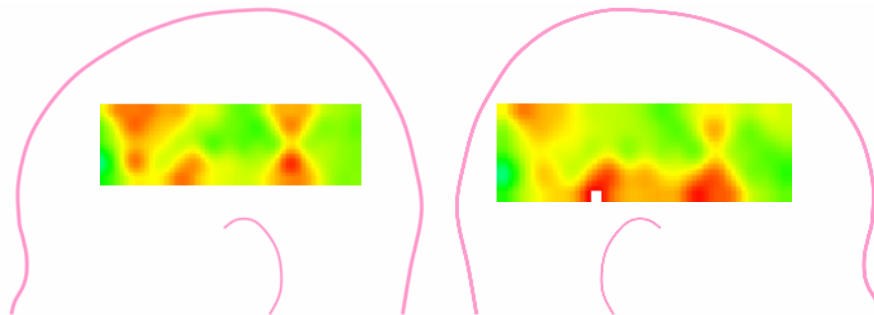
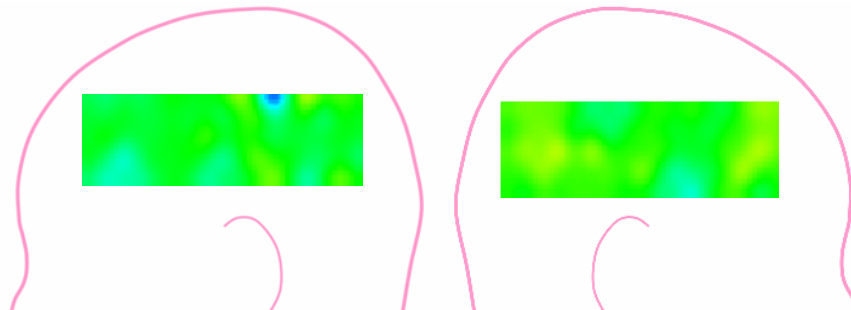


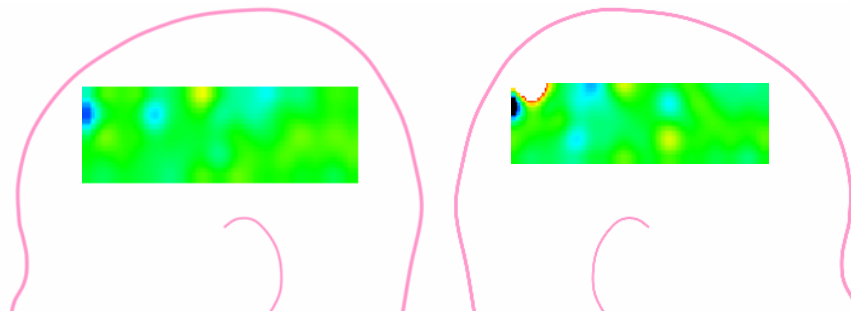
図 5：第 1・2 被験者群の congruent タスク遂行時の脳の賦活
(図中では，青 緑 黄色 赤の順で賦活が大きい。)

また incongruentJE タスクに関しては第 1・2・3 被験者群間で左右両部位ともに有意差が見られなかったことから (図 6)，ストループ効果に関しても第 2 言語接触開始年齢が重要な要因となる可能性も考えられる。

第 1 被験者群 incongruentJE タスク左部位 incongruentJE タスク右部位



第 2 被験者群 incongruentJE タスク左部位 incongruentJE タスク右部位



第3被験者群 incongruentJE タスク左部位 incongruentJE タスク右部位

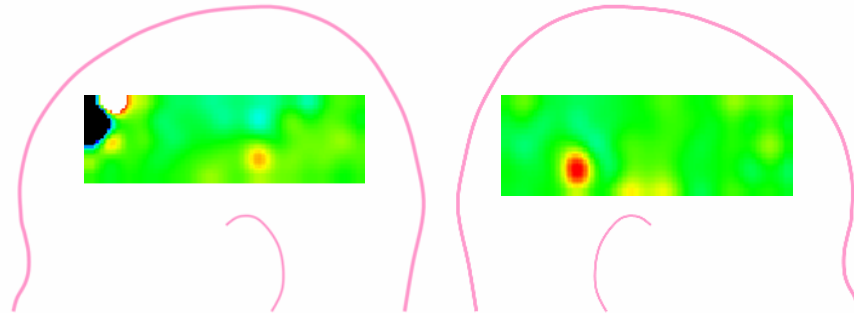
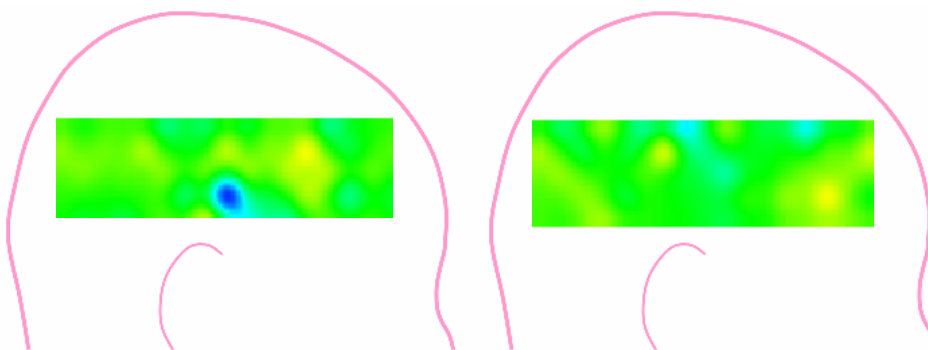


図6：第1・2・3群の incongruentJE タスク遂行時の脳の賦活

行動データに関して、群間比較ではどの被験者群間でも有意差は見られなかった。しかし、fNIRS データの被験者群間でどの被験者群間においても有意差が見られなかったのは congruentJE タスクの右部位のみであった。よって congruentJE タスクと右部位の賦活には相関関係があると考えられる（図7）。

第1被験者群

第2被験者群



第3被験者群

第4被験者群

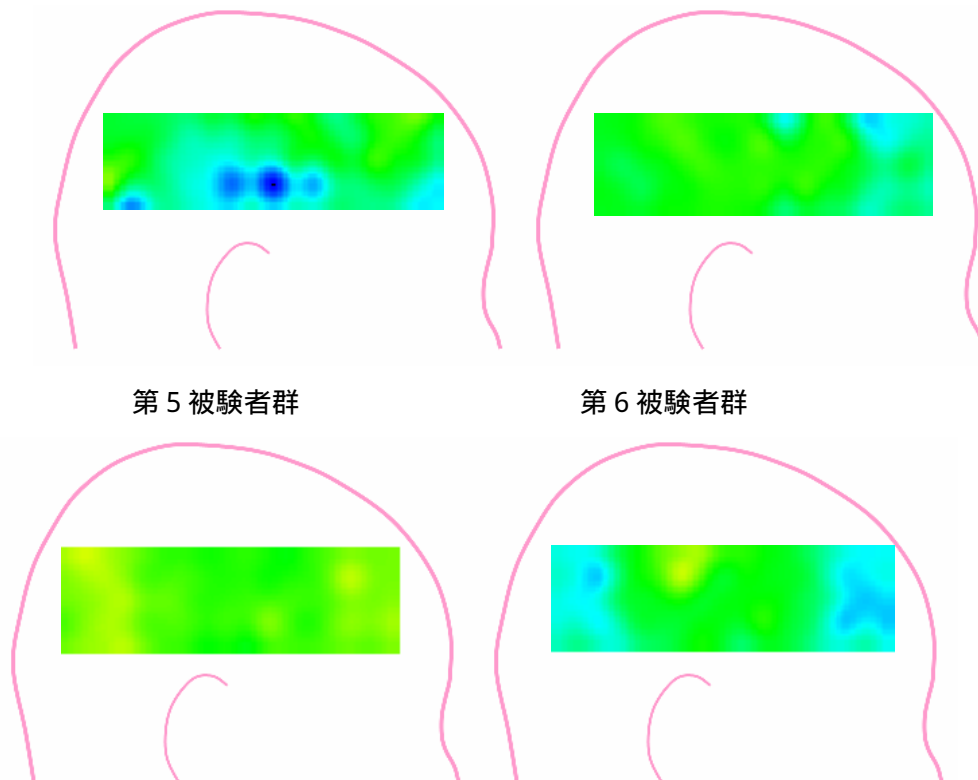


図 7：右部位の各被験者群の congruentEJ タスク遂行時の脳の賦活

また行動データの被験者群間分析から、BST 遂行に関しては第 2 言語接触開始年齢は影響を与えないことが明らかとなった。

被験者群内比較において、全ての被験者群内で incongruent タスクのタスク遂行時間が congruent タスクよりも短くなることはなかった。この結果はこれまでの先行研究と一致する (Ikezawa *et al.* (2009), Jourdan *et al.* (2009), Schroeter *et al.* (2002) Schroeter *et al.* (2004) Ravnkilde *et al.* (2002), Zied *et al.* (2004), 苧阪 (1990), 苧阪 (1994))。しかし、JE タスクと EJ タスクの双方の比較で有意差が見られる場合と、どちらか一方でのみ有意差が見られる場合があり、言語内ストループ効果に関しては被験者群ごとに異なる傾向が見られた。行動データでは第 1・4・6 被験者群では言語内と言語間の双方でストループ効果が見られたが、fNIRS データでもその傾向が見られたのは第 4 被験者群のみであった。

第 5 章 結論

本研究のリサーチクエスションは、以下の通りである。

日本語と英語を母語または第 2 言語とする被験者を対象とし、第 2 言語接触開始年齢が

異なる被験者群間においてバイリンガルストループ課題を実行する。課題遂行中の言語スイッチ時の fNIRS 値に関して以下のことを調べた。

RQ 1 : 第 2 言語接触開始年齢は 2 言語の文字音読の際の脳の賦活に影響を与えるのか

RQ 2 : 認知的葛藤のあるタスク遂行時の脳の賦活は、第 2 言語接触開始年齢の影響を受けるのか

RQ 1 について本研究では、提示された文字を読む際には生前から第 2 言語に接触していれば、その後の環境に関係なく脳の賦活が等しくなることが分かった。つまり 3 歳以降に 2 言語接触を開始した被験者群とは差があった。加えて日本語から英語にスイッチする際の左部位の賦活に関しては、その賦活の程度まで同等となった。

RQ 2 に関して認知的葛藤であるストループ効果においては、小学校入学前に 2 言語に接した被験者群では、タスク遂行中の脳の賦活に関して有意差は認められなかった。この結果から小学校入学までに 2 言語に接するかどうか、脳の賦活に影響を与える可能性が示唆された。

本研究遂行中に付随的に分かったのは、行動データと脳の賦活の関連性である。これらの観点から考慮すると、相関関係があったのは congruentJE タスク遂行時間と右部位、第 4 被験者群のストループ効果に関してのみであった。つまり、行動データと fNIRS データは常に関連性があるとは限らないことが明らかとなった。

次に本研究結果のこの分野への貢献点について考えてみる。生前（本研究の群分けから慎重に言えば、少なくとも 3 歳前）に 2 言語に接するかどうか、2 言語運用の際の脳の賦活に影響を与えることが判明した。このことは、臨界期が思春期前後であるという従来の説を覆す結果となった。

本研究にはいくつか限界点がある。まず第 1 の問題点としてタスクデザインが挙げられる。本研究ではブロックデザインを採用していないため、言語スイッチ時の fNIRS 値の変化しか計測できず、単言語（英語または日本語）使用時の脳の賦活に関しては正確には分からない。さらにタスクの指示の仕方に関しても先行研究と同じ形式を用いることで、異なる結果が得られた可能性がある。また 2 言語タスク遂行中の脳の賦活には 2 言語の習熟度、使用頻度、加えて類似性が関係している（入来、(2008)）ため、今後これらの要因についても考慮する必要がある。

今後は言語スイッチ時のみならず、単言語使用時の脳の賦活に関して調査することで、本研究の結果を検証することができる。また、被験者の言語習得歴や 2 言語間の距離に関しても考慮することで、臨界期仮説について更なる知見が得られる可能性もある。更に、fMRI 言語実験が幼い子ども対象に困難である一方で、fNIRS が健常者である児童を十分研究対象とできることが本研究で明らかとなった。したがって、従来の心理言語学と脳機能イメージング法を融合させた領域の中で、fNIRS を今後有用なツールとして使用する研究が推進されるべきである。

参考文献・引用文献

欧文文献

- Chee, Michael W. L., E. W. L. Tan, and T. Thiel. (1999). Mandarin and English Single Word Processing Studied with Functional Magnetic Resonance Imaging, *The Journal of Neuroscience* 19(8), 3050–56.
- Homae F, Hama W, Tamami N, Kayo A, Gentaro T. (2006). The right hemisphere of sleeping infant perceives sentential prosody: *Neuroscience Research* 54, 276-280.
- Ikezawa K, Masao I, Ryouhei I, Michiyo A, Leonides C, Kazutaka O, Yuka Y, Naomi I, Ryu K, Hidetoshi T, Takayuki N, Ryuji S, Tetsuhiko Y, Hiroaki K, Ryota H, Masatoshi T. (2009). Impaired regional hemodynamic response in schizophrenia during multiple prefrontal activation tasks: A two-channel near-infrared spectroscopy study, *Schizophrenia Research* 108, 93–103.
- Johnsrude I. S., Penhune V. B., Zatorre R J. (2000). Functional specificity in the right human auditory cortex for perceiving pitch direction, *Brain* 123, 155-163.
- Kasai, S. (2009). Cortical activity underlying the processing of native and second language single - word repetition task of children and ADULTS: A NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY STUDY, 首都大学修士論文.
- Kim K, Relkin N, Lee K, Hirsch J. (1997) Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* 388, 171–174.
- Lenneberg, E. (1967). *Biological Foundation of Language*, New York: OUP.
- Meyer M, Steinhauser K, Alter K, Friederici A. D, von Cramon D. Y, (2004) Brain activity varies with modulation of dynamic pitch variance in sentence melody, *Brain Lang.* 89, 277-289.
- Nancy E. Adelman, Vinod M, Christine M. Blasey, Christopher D. White, Ilana S. Warsofsky, Gary H. Glover,§ and Allan L. Reiss. (2002). A Developmental fMRI Study of the Stroop Color-Word Task, *NeuroImage* 16, 61–75.
- Newport, E. (1990). Maturational constraints on language learning, *Cognitive Science* 14, 11-28.
- Ojima S, Naoko N, Hiroko M, Takahiro H, and Hiroko H. (2010). Neural Correlates of Foreign-language Learning in Childhood: A 3-Year Longitudinal ERP Study *Journal of Cognitive Neuroscience*.
- Perani, D., E. Paulesu, N. Sebastian Galles, E. Depoux, S. Dehaene, V. Bettinardi, S. F. Cappa, F. Fazio, and J. Mehler. (1998). The bilingual brain Proficiency and age of acquisition of the second language, *Brain* 121, 1841-52.
- Quaresima V, Marco F, Marco C. P. van der S, Jan M, and Willy N.J.M.C. (2002) Lateral frontal cortex oxygenation changes during translation and language switching revealed by non-invasive near-infrared multi-point measurements, *Brain Research Bulletin*, Vol. 59, No. 3, 235–243.
- Ravnikilde B, Poul V, Raben R, Albert G, and Anders G. (2002). Putative Tests of Frontal Lobe

- Function: A PET-Study of Brain Activation During Stroop's Test and Verbal Fluency, *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, Vol. 24, No. 4, 534-547.
- Scherer L. C., Francine G, Frederic L, Noureddine S, Habib B, Ana I. A. (2006). An optical imaging study of semantic and syntactic processing by bilinguals, *Brain and Language* 99, 218-219.
- Schroeter M L, Stefan Z, Margarethe W, and D, Yves von C. (2004). Prefrontal activation due to Stroop interference increases during development—an event-related fNIRS study, *NeuroImage* 23, 1317-1325.
- Schroeter M L, Stefan Z, Thomas K, Frithjof K D, Yves von C. (2002). Near-Infrared Spectroscopy Can Detect Brain Activity During a Color-Word Matching Stroop Task in an Event-Related Design, *Human Brain Mapping* 17, 61-71
- Sonya J. M., Simone C, Peter W, Matthias L. S. (2009). Right prefrontal brain activation due to Stroop interference is altered in attention-deficit hyperactivity disorder—A functional near-infrared spectroscopy study, *NeuroImage* 16, 61-75.
- Yanagisawa, H, Ippeita D, Daisuke T, Morimasa K, Masako O, Yasushi K, Hideaki S. (2010). Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test, *NeuroImage* 50, 1702-1710.
- Zatorre R J, Evans A C, Meyer E, Gjedde A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing, *Science* 256, 846-849.
- Zied K M, Allain P, Pinon K, Havet-Thomassin V, Aubin G, Roy A, and Le Gall Didier. (2004). Bilingualism and adult differences in inhibitory mechanisms: Evidence from a bilingual stroop task *Brain and Cognition* 54, 254-256.

和文文献

- 石川慎一郎 (2009) 第二言語習得研究と脳科学, 『システム制御情報学会誌』, 53(4), 143-148.
- 入来篤史 (2008) 『言語と思考を生む脳』, 東京大学出版会.
- 大石晴美 (2001) インプットからインテイクへの言語情報処理過程—言語の脳科学的視点より英語教育への応用—, 『ことばの科学』 14, 321-340.
- 大石晴美 (2006) 『脳科学からの第二言語習得論』, 昭和堂.
- 大石晴美, 木下徹 (2008) 第一言語処理と第二言語処理における脳活性状態の違い—日本語と英語のリスニングにおいて—日本語と英語のリスニングにおいて—, 『ことばの科学』 21, 143-145.
- 苅阪直行 (2000) 『脳とワーキングメモリ』, 京都大学学術出版会.
- 苅阪直行 (2010) 『脳イメージ』, 培風館.
- 苅阪満里子 (1994) バイリンガルの言語処理(4): 関連語のストループ効果について, 『日本教育心理学会総会発表論文集 (36)』, 380.
- 苅阪満里子 (1990) バイリンガルとストループ効果, 『大阪外国語大学論集 (4)』, 77-87.

酒井邦嘉 (2002) 『言語の脳科学』, 中公新書.

嶋田博行 (1994) 『ストループ効果—認知心理学からのアプローチ—』, 培風館.

白井恭弘 (2008) 『外国語学習の科学: 第二言語習得論とは何か』, 岩波書店.

土屋澄夫・広野威志 (2000) 『新英語化教育法入門』, 研究者.

福田正人編集 (2009) 『精神疾患と NIRS—光トポグラフィー検査による脳機能イメージング』, 中山書店.

丸山俊, 今野晃嗣, 日高聡太, 田中章浩, 小泉政利, 行場次朗, 萩原裕子 (2008) 英語活動経験が物語聴取時における幼児の脳活動に及ぼす影響: NIRS による検討, 『電子情報通信学会技術研究報告. TL, 思考と言語』, 108, 45-48.

横山悟, 吉本啓, 川島隆太 (2007) 外国語学習者の言語能力評価における脳機能データの応用, 『電子情報通信学会技術研究報告. TL, 思考と言語』 107, 37-40

補遺 1 分析対象抽出10秒一覧

		J-congruent	E-congruent	J-incongruent	E-incongruent
G1日 英	左	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	最初 10 秒
	中央	終わり 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
	右	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒
G2日 英	左	終わり 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒
	中央	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
	右	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒
G3日 英	左	最初 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒
	中央	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒
	右	最初 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒
G4日 英	左	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒
	中央	最初 10 秒	真ん中 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒
	右	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒
G5日 英	左	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒
	中央	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒

バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

	右	最初 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒
G6 日 英	左	最初 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒
	中央	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	最初 10 秒	終わり 10 秒
	右	最初 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒
		E-congruent	J-congruent	E-incongruent	J-incongruent
G1 英 日	左	終わり 10 秒	最初 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒
	中央	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒	真ん中 10 秒
	右	真ん中 10 秒	最初 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒
G2 英 日	左	最初 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	最初 10 秒
	中央	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒
	右	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒
G3 英 日	左	最初 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒	最初 10 秒
	中央	最初 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒
	右	最初 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
G4 英 日	左	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
	中央	終わり 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒
	右	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	真ん中 10 秒
G5 英 日	左	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
	中央	最初 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒
	右	真ん中 10 秒	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
G6 英 日	左	終わり 10 秒	最初 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒
	中央	真ん中 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒	終わり 10 秒
	右	終わり 10 秒	最初 10 秒	終わり 10 秒	最初 10 秒

補遺 2 行動データ分析結果

		congruent		incongruent		J-incongruent			E-incongruent		
task type	# S	日本語	英語	日本語	英語	正答数	問題数	正答率	正答数	問題数	正答率
E→J	1	19.04	20.45	22.86	22.33	20	20	100%	20	20	100%
J→E	2	29.34	29.19	32.31	34.06	20	20	100%	20	20	100%
J→E	3										

バイリンガルスト룹テスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

J→E	4	22.38	23.79	35.5	22.79	16	20	80%	20	20	100%
J→E	5	20.02	16.86	27.83	18.94	20	20	100%	20	20	100%
J→E	6	25.81	24.58	23.38	22.44	20	20	100%	20	20	100%
J→E	7	32.99	25.35	30.99	24.02	20	20	100%	20	20	100%
J→E	8	25.21	25.68	25.27	28.01	20	20	100%	20	20	100%
J→E	9	26.68	24.91	25.65	27.17	20	20	100%	20	20	100%
J→E	10	23.71	25.15	26.05	25.61	20	20	100%	19	20	95%
J→E	11	21.74	17.41	20.98	19.46	20	20	100%	20	20	100%
J→E	12	34.14	21.22	31.22	28.79	20	20	100%	20	20	100%
J→E	13	26.17	23.35	40.27	48.36	20	20	100%	20	20	100%
J→E	14	23.44	22.57	26.38	26.18	20	20	100%	20	20	100%
J→E	15	24.55	21.42	28.67	25.84	20	20	100%	20	20	100%
	16										!
J→E	17	20.47	19.33	26.18	23.73	20	20	100%	20	20	100%
J→E	18	22.62	18.42	42.52	40.42	20	20	100%	20	20	100%
J→E	19	27.95	19.94	27.67	32.79	20	20	100%	20	20	100%
J→E	20	28.84	25.39	38.12	42.31	20	20	100%	20	20	100%
J→E	21	24.57	24.57	32.39	33.66	20	20	100%	20	20	100%
J→E	22	24.19	22.49	27.26	25.05	20	20	100%	20	20	100%
J→E	23	20.44	17.02	15.59	21.72	20	20	100%	20	20	100%
J→E	24	21.84	21.27	26.28	25.17	20	20	100%	20	20	100%
J→E	25	19.38	18.53	21.63	22.44	20	20	100%	20	20	100%
J→E	26	20.36	19.3	43.32	36.64	12	20	60%	20	20	100%
J→E	27	24.3	22.03	33.46	29.09	20	20	100%	20	20	100%

バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

J→E	28	30.15	31.47	27.99	28.39	20	20	100%	20	20	100%
J→E	30	28.45	27.59	36.49	35.34	20	20	100%	20	20	100%
J→E	31	19	19.79	35.35							
J→E	32	18.46	17.72	34.4	28.27	20	20	100%	20	20	100%
J→E	33	25.55	23.4	25.31	26.29	20	20	100%	20	20	100%
J→E	34	19.54	14.67	35.7	33.48	20	20	100%	20	20	100%
J→E	35	23.83	21.63	23.19	22.88	20	20	100%	20	20	100%
J→E	36	22.56	22.04	45.99	38.21	20	20	100%	20	20	100%
J→E	37	23.04	17.96	28.63	27.37	20	20	100%	20	20	100%
J→E	38	16.68	15.69	17.43	18.12	20	20	100%	20	20	100%
J→E	39	23.63	20.83	28.47	25.17	20	20	100%	20	20	100%
E→J	40	24.01	27.15	26.11	26.1	19	20	95%	20	20	100%
J→E	41	27.39	20.92	23.34	26.5	20	20	100%	20	20	100%
J→E	42	28.89	20.29	72.74	44.24	20	20	100%	20	20	100%
J→E	43	21.77	20.57	45.11	33.3	19	20	95%	20	20	100%
J→E	44	25.35	23.01	42.68	36.74	20	20	100%	20	20	100%
J→E	45	27.84	24.5	27.29	29.68	20	20	100%	20	20	100%
J→E	46	19.65	16.67	38.44	37.77	19	20	95%	18	20	90%
J→E	47	22.75	21.1	21.69	21.94	20	20	100%	20	20	100%
J→E	48	32.56	28.06	25.37	25.33	20	20	100%	20	20	100%
J→E	49	23.16	20.69	25.27	26.39	20	20	100%	20	20	100%
J→E	50	29.23	25.13	31.04	30.55	20	20	100%	20	20	100%
J→E	51	19.54	18.65	23.12	22.88	20	20	100%	20	20	100%
J→E	53	23.86	22.9	22.72	26.87	20	20	100%	20	20	100%

バイリンガルストリープテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

J→E	54	28.55	25.22	27.16	26.14	20	20	100%	20	20	100%
J→E	55	30.59	27.88	38.77	37.14	20	20	100%	20	20	100%
J→E	58	17.22	17.22	31.69	30.33	19	20	95%	20	20	100%
J→E	59	27.73	21.42	30.67	31.27	20	20	100%	20	20	100%
E→J	60	16.66	16.97	29.73	18.82	20	20	100%	20	20	100%
E→J	61	29.81	28.89	36.89	36.39	20	20	100%	20	20	100%
E→J	62	15.08	22.2	28.99	28.7	20	20	100%	20	20	100%
E→J	63	16.76	18.77	20.12	21.32	20	20	100%	20	20	100%
E→J	64	21.96	23.1	23.78	28.18	20	20	100%	20	20	100%
E→J	65	31.99	32.85	35.36	35.57	20	20	100%	20	20	100%
E→J	68	34.75	37.27	38.2	35.87	20	20	100%	20	20	100%
E→J	70	28.01	28.75	35.03	35.03	20	20	100%	19	20	95%
E→J	71	22.71	26.86	30.15	30.37	20	20	100%	20	20	100%
E→J	72	33.26	35.28	30.51	31.91	20	20	100%	20	20	100%
E→J	73	24.93	27.77	30.27	29.21	20	20	100%	20	20	100%
J→E	74	25.24	24.38	26.41	29.04	20	20	100%	20	20	100%
J→E	75	35	32.12	34.93	40.42	20	20	100%	20	20	100%
J→E	76	29.39	25.56	30.61	30.22	20	20	100%	20	20	100%
J→E	77	32.25	26.67	33.68	28.35	20	20	100%	20	20	100%
E→J	78	16.73	20.34	28.2	25.49	20	20	100%	20	20	100%
E→J	79	17.94	18.74	27.18	24.9	20	20	100%	20	20	100%
E→J	80	19.5	20.19	22.62	20.96	20	20	100%	20	20	100%
E→J	81	18.05	17.99	23.38	22.66	20	20	100%	20	20	100%
E→J	82	17.15	18.39	27.41	26.71	20	20	100%	20	20	100%

バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

E→J	83	18.17	19.35	29.33	25.12	20	20	100%	20	20	100%
E→J	84	20.2	19.24	28.1	25.51	20	20	100%	20	20	100%
E→J	85	22.35	34.65	45.68	34.34	20	20	100%	20	20	100%
E→J	86	19.76	22.45	21.44	22.52	20	20	100%	20	20	100%
E→J	88	16.15	17.79	20.97	25.02	20	20	100%	20	20	100%
E→J	91	18.87	23.18	23.9	24.34	20	20	100%	20	20	100%
E→J	93	13.85	15.43	22.64	20.32	20	20	100%	20	20	100%
J→E	94	25.65	23.89	26.15	27.61	20	20	100%	20	20	100%
E→J	95	26.27	29.06	29.32	28.78	20	20	100%	20	20	100%
E→J	96	21.86	26.02	28.6	26.17	20	20	100%	20	20	100%
E→J	98	17.97	20.81	23.79	24.14	20	20	100%	20	20	100%
J→E	99	24.83	25.32	26.9	26.99	20	20	100%	20	20	100%
E→J	101	32.78	35.25	33.49	35.62	20	20	100%	20	20	100%
E→J	102	28.42	30.3	29.27	34.36	20	20	100%	20	20	100%
E→J	103	22.76	23.38	22.81	24.49	20	20	100%	20	20	100%
E→J	104	23.56	23.62	29.32	24.12	20	20	100%	20	20	100%
E→J	105	18.78	18.91	23.1	22.8	20	20	100%	20	20	100%
E→J	106	26.59	26.58	27.6	26.95	20	20	100%	20	20	100%
E→J	107	27.38	28.3	24.75	25.77	20	20	100%	20	20	100%
J→E	108	37.09	31.2	32.59	34.57	20	20	100%	20	20	100%
J→E	121	23.44	24.11	27.94	24.54	20	20	100%	20	20	100%
J→E	200	26.93	25.86	35.37		20	20	100%			
J→E	201	34.7	31.43	36.08	31.76	20	20	100%	20	20	100%
J→E	202	22.18	22.03	22.3	21.2	20	20	100%	20	20	100%

バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

J→E	203	26.22	22.89	33.18	29.63	19	20	95%	20	20	100%
J→E	204	29.89	23.72	26.71	27.59	20	20	100%	20	20	100%
J→E	206	22.18	17.96	20.44	21.32	20	20	100%	20	20	100%
E→J	207	22	22.57	26.1	24.13	20	20	100%	20	20	100%
E→J	208	23.86	26.79	25.6	27.24	20	20	100%	20	20	100%
E→J	209	20.16	18.29	19.44	18.55	20	20	100%	20	20	100%
E→J	210	26.02	27.07	33.72	28.89	20	20	100%	20	20	100%
E→J	211	20	17.21	21.34	23.1	20	20	100%	20	20	100%
E→J	212	41.18	35.21	44.7	42.4	20	20	100%	20	20	100%
E→J	214	29.91	35.02	34.21	28.35	20	20	100%	20	20	100%
J→E	214	25.16	21.93	28.75	25.15	20	20	100%	20	20	100%
E→J	216	26.22	32.74	33.07	37.14	19	20	95%	18	20	90%
E→J	217	22.33	21.35	35.58	31.69	20	20	100%	20	20	100%
J→E	300	15.84	14.11	22.81	21.5	20	20	100%	20	20	100%
J→E	301	14.01	15.71	19.57	19.83	20	20	100%	20	20	100%
E→J	303	16.43	14.23	15.16	17.07	20	20	100%	20	20	100%
E→J	304	15.05	16.77	18.35	21.46	20	20	100%	20	20	100%
E→J	305	10.05	10.86	15.77	17.63	20	20	100%	20	20	100%
E→J	306	16.73	18.38	17.8	18.56	20	20	100%	20	20	100%
J→E	401	30.1	27.62	33.74	33.48	20	20	100%	20	20	100%
J→E	402	24.22	25.62	33.02	37.25	20	20	100%	20	20	100%
J→E	403	27.31	28.12	30.62	32.3	20	20	100%	20	20	100%
J→E	404	40.25	37.96	38.91	44.12	20	20	100%	20	20	100%
J→E	405	24.06	23	27.38	22.14	20	20	100%	20	20	100%

バイリンガルストリープテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

J→E	406	38.86	36.88	40.78	38.39	20	20	100%	20	20	100%
J→E	407	12.79	12.55	16.06	17.41	20	20	100%	20	20	100%
J→E	408	17.16	11.7	14.67	16.44	20	20	100%	20	20	100%
J→E	409	34.06	29.76	32.71	30.09	20	20	100%	20	20	100%
J→E	410	36.06	30.09	35.41	34.37	20	20	100%	20	20	100%
J→E	412	24.11	22.61	33.63	35.61	20	20	100%	20	20	100%
J→E	413	20.08	20.86	25.43	20.51	20	20	100%	20	20	100%
E→J	414	30.26	31.61	33.84	32.91	20	20	100%	20	20	100%
E→J	415	20.49	23.38	22.65	26.18	20	20	100%	20	20	100%
E→J	416	17.07	24.71	27.71	26.74	20	20	100%	20	20	100%
E→J	418	59.75	65.31	62.57	61.35	20	20	100%	20	20	100%
E→J	419	33.26	34.39	31.87	30.56	20	20	100%	20	20	100%
E→J	420	25.89	29.11	25.79	27.82	20	20	100%	20	20	100%
E→J	421	26.52	30.51	30.7	33.62	20	20	100%	20	20	100%
E→J	422	16.29	21.95	20.71	26.37	20	20	100%	20	20	100%
E→J	423	29.84	29.05	28.47	28.45	20	20	100%	20	20	100%
E→J	424	24.2	28.13	28.67	27.73	20	20	100%	20	20	100%
E→J	425	24.24	26.82	28.95	31.22	20	20	100%	20	20	100%
E→J	426	41.54	37.09	34.16	39.79	20	20	100%	20	20	100%
E→J	427	19.73	20.59	28.71	28.37	20	20	100%	20	20	100%
J→E	428	17.56	14.65	19.32	18.89	20	20	100%	20	20	100%
J→E	429	24.5	23.95	27.63	28.89	20	20	100%	20	20	100%

補遺 3 fNIRS データ (6 部位の 10 秒抽出部分の fNIRS 平均値サンプル)

task duration: タスク種類

最初の 0.00-10.01: 日本語 congruent タスク

2 番目の 0.00-10.01: 英語 congruent タスク

3 番目の 0.00-10.01: 日本語 incongruent タスク

4 番目の 0.00-10.40: 英語 incongruent タスク

task duration	左			右		
	ch-17 OxyHb	ch-25 OxyHb	ch-34 OxyHb	ch- 9 OxyHb	ch-18 OxyHb	ch-26 OxyHb
0.00	-0.04084	-0.04664	-0.03201	-0.00921	-0.01772	-0.00747
0.13	-0.04675	-0.04999	-0.02942	-0.01442	-0.02	-0.00623
0.26	-0.04804	-0.05351	-0.02918	-0.01675	-0.01594	-0.00912
0.39	-0.03777	-0.04922	-0.02382	-0.02427	-0.02474	-0.01692
0.52	-0.03979	-0.04759	-0.02234	-0.0053	-0.01753	-0.01023
		.			.	
		.			.	
9.49	-0.03024	-0.04442	-0.02011	-0.00566	-0.02355	-0.01007
9.62	-0.03044	-0.0438	-0.0225	-0.008	-0.014	-0.01254
9.75	-0.03977	-0.04322	-0.03175	-0.00532	-0.01937	-0.02012
9.88	-0.03965	-0.03989	-0.02299	-0.00829	-0.02376	-0.01961
10.01	-0.03331	-0.03855	-0.0226	0.000423	-0.01874	-0.00979
0.00	-0.03662	-0.04639	-0.02954	-0.02335	-0.02664	-0.02487
0.13	-0.02903	-0.04257	-0.02283	-0.01401	-0.02758	-0.0221
0.26	-0.03199	-0.04554	-0.02296	-0.01285	-0.02644	-0.02563
0.39	-0.03842	-0.04615	-0.02584	-0.01811	-0.02266	-0.02093
0.52	-0.0383	-0.04907	-0.02585	-0.02366	-0.02556	-0.01867
		.			.	
		.			.	
9.49	-0.04738	-0.05114	-0.0272	-0.01864	-0.03171	-0.00702
9.62	-0.04242	-0.05465	-0.02658	-0.02326	-0.0331	-0.01012
9.75	-0.04583	-0.05213	-0.02756	-0.01618	-0.03014	-0.01024
9.88	-0.0453	-0.04862	-0.02358	-0.034	-0.03974	-0.01256
10.01	-0.03682	-0.05027	-0.02021	-0.0166	-0.03654	-0.00837

バイリンガルストループテスト遂行時の脳賦活部位に関する fNIRS 脳イメージング研究

0.00	-0.03312	-0.04432	-0.02473	-0.02028	-0.03149	-0.00315
0.13	-0.03206	-0.03848	-0.01723	-0.01625	-0.03037	-0.0005
0.26	-0.03292	-0.0426	-0.01886	-0.00492	-0.02188	0.002731
0.39	-0.03415	-0.03876	-0.019	-0.01884	-0.01797	-0.00654
0.52	-0.03532	-0.04218	-0.01935	-0.01101	-0.02988	-0.01167
		.			.	
		.			.	
9.49	-0.00754	-0.02129	-0.0103	-0.00531	-0.01279	-0.01308
9.62	-0.02039	-0.03317	-0.01388	-0.01671	-0.0184	-0.01128
9.75	-0.01489	-0.03057	-0.0179	-0.00973	-0.01473	-0.01468
9.88	-0.02718	-0.02902	-0.02211	-0.01805	-0.018	-0.02332
10.01	-0.01545	-0.02764	-0.01261	-0.01762	-0.02262	-0.02153
0.00	-0.01693	-0.02147	-0.00212	-0.00634	-0.01942	-0.01709
0.13	-0.01165	-0.01935	-0.00562	0.007107	-0.01563	-0.01697
0.26	-0.01242	-0.02046	-0.01434	-0.00099	-0.00939	-0.00978
0.39	-0.01233	-0.02147	-0.00974	-0.00733	-0.01779	-0.017
0.52	-0.01934	-0.02535	-0.00715	-0.00831	-0.02042	-0.01816
		.			.	
		.			.	
9.49	-0.00639	-0.01754	-0.00223	0.006799	-0.01479	0.008803
9.62	-0.01656	-0.02913	-0.01096	-0.00379	-0.01053	0.004184
9.75	-0.02173	-0.02605	-0.01046	-0.00954	-0.01304	0.001697
9.88	-0.0135	-0.02211	-0.00589	-0.01378	-0.01454	-0.00626
10.01	-0.01029	-0.02485	-0.00489	-0.00503	-0.01364	0.008948
10.14	-0.01019	-0.0252	-0.00953	-0.00096	-0.00536	0.000685
10.27	-0.01301	-0.02235	-0.0061	-0.00862	-0.0172	-0.00657
10.40	-0.01617	-0.02414	-0.01087	-0.01501	-0.01257	-0.00111